



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

***Funktionsgerechte Spezifikation  
geometrischer Eigenschaften mit dem  
System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation***

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Chemnitz genehmigte  
Habilitationsschrift  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur habilitatus (Dr.-Ing. habil.)

vorgelegt der  
Technischen Universität Chemnitz

von Dr.-Ing. Sophie Gröger  
geboren am 04. Juli 1972 in Karl-Marx-Stadt

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Dietzsch  
Prof. Dr.-Ing. A. Weckenmann  
Prof. Dr.-Ing. E. Leidich

Chemnitz, den 10. Januar 2013



***„Eine zu messende Eigenschaft muss erst definiert werden, bevor sie toleriert werden kann.“***

**Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. eh. mult. Harry Trumpold**

*Gründer des Instituts für Messtechnik und Austauschbau an der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt*

*13. Juli 1928 - 18. November 2012*



## **Bibliographische Beschreibung**

Gröger, Sophie

Funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation

Habilitation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz,  
Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung,  
Chemnitz, 10. Januar 2013.

158 Seiten

98 Abbildungen

31 Tabellen

99 Literaturzitate

### Referat

Das System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation ist eine umfangreiche Zusammenstellung von Normen, die die geometrische Produktspezifikation und den Nachweis der Bauteileigenschaften regelt. Die vorliegende Arbeit stellt die im Jahr 2012 gültigen Normen und deren Inhalte dar. Den Schwerpunkt bildet die funktionsgerechte Spezifikation. Ausgehend von den in den Normen festgelegten Möglichkeiten und bisherigen Ansätzen werden ein funktionsgerechtes Spezifikationsmodell abgeleitet und die Grenzen des Systems aufgezeigt.

### Schlagworte

Geometrische Produktspezifikation und -verifikation, Normen, funktionsgerechtes Spezifikationsmodell, geometrische Eigenschaften



## **Vorwort**

Die Habilitationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin und stellvertretende Institutsleiterin an der Professur Fertigungsmesstechnik und Qualitätssicherung der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank gilt Professor Dietzsch für die langjährige Förderung am Institut und im wissenschaftlichen Umfeld. Mit den an mich übertragenen Leitungsfunktionen konnte ich mich umfassend in die Organisation, Lehre und Forschung einbringen. Seine unermüdliche Normungsarbeit bildete die Motivation für diese Arbeit und eine umfassende Grundlage für Diskussionen und Unterstützung.

Ich danke auch Professor Nendel für sein Vertrauen und seine Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht möglich geworden wäre. Großer Dank gilt auch Professor Weckenmann, den ich seit vielen Jahren als international anerkannten Wissenschaftler auf dem Gebiet der Fertigungsmesstechnik sehr schätze. Ich danke ebenfalls Professor Leidich für die Bereitschaft zur Begutachtung der Arbeit und die intensive Zusammenarbeit bei unserem gemeinsamen Forschungsvorhaben.

Sehr dankbar bin ich auch meinen Kolleginnen und Kollegen für das Vertrauen in mich und die Begeisterung für die Fertigungsmesstechnik und das Qualitätsmanagement. Den Studenten, die durch ihre wissenschaftlichen Arbeiten Anregungen geliefert haben, danke ich für den Fleiß.

Ich danke meiner gesamten Familie für die Unterstützung, besonders Professor Spensberger für die bereichernden Gespräche. Meiner Anne danke ich für ihre Toleranz.

Die in der Arbeit verwendeten Begriffe entsprechen dem Stand der Normung zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit Ende 2012. Änderungen der Benennungen, die nachfolgenden in die Normen eingebracht wurden, sind nicht berücksichtigt.

## Inhaltsverzeichnis

Bibliographische Beschreibung.....	I
Vorwort .....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungen.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Problemstellung und Motivation.....	3
3 Grundnormen im System der Geometrischen Produktspezifikation und -prüfung ..	11
3.1 Normung .....	11
3.1.1 Allgemeines.....	11
3.1.2 Internationale Organisation für Normung (ISO).....	12
3.1.3 Europäisches Komitee für Normung (CEN).....	13
3.1.4 Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) .....	13
3.1.5 ISO/TC 213 .....	14
3.2 Aufbau des GPS-Systems - Masterplan.....	14
3.3 Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln - ISO 8015 .....	19
3.3.1 Grundlegendes.....	19
3.3.2 Grundsatz des Aufrufens (Invokationsprinzip).....	20
3.3.3 Grundsatz der GPS-Normenhierarchie .....	20
3.3.4 Grundsatz der bestimmenden Zeichnung .....	20
3.3.5 Grundsatz des Geometrieelementes.....	20
3.3.6 Grundsatz der Unabhängigkeit.....	21
3.3.7 Grundsatz der Dezimaldarstellung .....	21
3.3.8 Grundsatz der Standardfestlegung (Defaultprinzip) .....	21
3.3.9 Grundsatz der Referenzbedingung .....	21



3.3.10	Grundsatz des starren Werkstücks .....	22
3.3.11	Grundsatz der Dualität (Spezifikation, Verifikation) .....	22
3.3.12	Grundsatz der Funktionsbeherrschung .....	22
3.3.13	Grundsatz der allgemeinen Spezifikation .....	22
3.3.14	Grundsatz der Verantwortlichkeit .....	23
4	Globale GPS-Normen .....	24
4.1	Grundlegende Modelle.....	24
4.1.1	Zusammenhang zwischen Modellen und Operatoren.....	24
4.1.2	Nennmodell .....	24
4.1.3	Nicht-ideales Oberflächenmodell (Hautmodell) .....	26
4.1.4	Diskretes und abgetastetes Oberflächenmodell .....	27
4.2	Grundlegende Operatoren .....	28
4.2.1	Funktionsoperator .....	28
4.2.2	Spezifikationsoperator .....	29
4.2.3	Verifikationsoperator .....	33
4.3	Definitionen von Geometrieelementen.....	35
4.3.1	Arten von Geometrieelementen .....	35
4.3.2	Ideales Geometrieelement.....	36
4.3.3	Nicht-ideales Geometrieelement.....	43
4.3.4	Abgeleitetes Geometrieelement.....	44
4.3.5	Ermöglichende Geometrieelemente .....	49
4.4	Operationen an Geometrieelementen.....	50
4.4.1	Operationen als Werkzeug .....	50
4.4.2	Partition .....	50
4.4.3	Extraktion.....	51
4.4.4	Filterung.....	52

## Inhaltsverzeichnis

---

4.4.5	Assoziation .....	53
4.4.6	Kollektion.....	55
4.4.7	Konstruktion .....	56
4.4.8	Rekonstruktion .....	57
4.5	Merkmale von und zwischen Geometrieelementen .....	57
4.6	Zusammenhang zwischen den Modellen, den Operationen an Geometrieelementen und den Geometrieelementen.....	59
4.7	Unsicherheiten .....	62
4.7.1	Der Begriff Unsicherheit .....	62
4.7.2	Übereinstimmungsunsicherheit.....	65
4.7.3	Spezifikationsunsicherheit.....	65
4.7.4	Messunsicherheit .....	66
4.7.5	Verfahrensunsicherheit .....	68
4.7.6	Umsetzungsunsicherheit.....	68
4.7.7	Entsprechungsunsicherheit.....	68
5	Allgemeine GPS-Normen .....	70
5.1	Geometrische Eigenschaften .....	70
5.2	Größenmaßelemente .....	74
5.2.1	Definition Größenmaß am Größenmaßelement.....	74
5.2.2	Örtliche Größenmaße von Größenmaßelementen.....	75
5.2.3	Globale Größenmaße von Größenmaßelementen.....	79
5.2.4	Toleranzsystem für Größenmaßelemente.....	83
5.3	Kennzeichnung der tolerierten Elemente, Toleranzzonen, Toleranzrahmen, Symbole und Bezüge .....	86
5.3.1	Toleranzrahmen und grundlegende Symbole .....	86
5.3.2	Arten von Toleranzzonen .....	88

5.3.3	Theoretisch genauer Abstand (TED) .....	90
5.3.4	Kennzeichnung des tolerierten Elementes .....	90
5.3.5	Bezüge .....	93
5.4	Form .....	98
5.5	Richtung, Ort und Lauf .....	100
5.5.1	Richtungstoleranzen .....	100
5.5.2	Ort.....	102
5.5.3	Lauf.....	105
5.6	Allgemeintoleranzen .....	106
5.7	Tolerierung von Abhängigkeiten der geometrischen Eigenschaften .....	107
5.7.1	Zusammenhang.....	107
5.7.2	Hüllbedingung.....	107
5.7.3	Maximum-/Minimum-Material-Bedingungen .....	110
5.8	Oberflächenbeschaffenheit .....	111
5.8.1	Überblick.....	111
5.8.2	Oberflächenunvollkommenheiten .....	112
5.8.3	Rauheit und Welligkeit eines Profils.....	115
5.8.4	Rauheit einer Fläche.....	122
6	Vorgehensweise zur funktionsgerechten Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem GPS-System.....	124
6.1	Bisherige Ansätze .....	124
6.2	Handlungsempfehlung .....	134
7	Bewertung des GPS-Systems .....	139
8	Zusammenfassung.....	143
9	Verzeichnisse .....	145
9.1	Literaturverzeichnis.....	145

## Inhaltsverzeichnis

---

9.1.1	Normen .....	145
9.1.2	Schriften und Bücher.....	148
9.2	Abbildungsverzeichnis.....	152
9.3	Tabellenverzeichnis.....	157
9.4	Anlagenverzeichnis .....	158

## Abkürzungen

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
A ... ZC	Lage des Toleranzfeldes für Bohrungen
a ... zc	Lage des Toleranzfeldes für Wellen
ACS	Beliebige Querschnittsfläche
APA	Any Process Allowed
CA	Flächenbezogener Durchmesser
CAD	Computer Aided Design
CC	Umfangsbezogener Durchmesser
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CT	Gemeinsame Toleranz
CV	Volumenbezogener Durchmesser
CZ	Gemeinsame Toleranzzone
$d_i$	Durchmesser
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	Hüllbedingung
ei	Grundabmaß der Welle
Ei	Grundabmaß der Bohrung
EN	Europäische Norm
es	Grundabmaß der Welle
Es	Grundabmaß der Bohrung
F	Bedingung des freien Zustandes

## Abkürzungen

---

GG	Assoziationskriterium nach der „Methode der kleinsten Quadrate“
GN	Assoziationskriterium „kleinstes umschriebenes Element“
GPS	Geometrische Produktspezifikation und -verifikation
GX	Assoziationskriterium „größtes einbeschriebenes Element“
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Toleranzgrad
L	Lower limit (Untergrenze)
LLS	Mindestmaß
LMR	Minimum-Material-Bedingung
In	Messstrecke
LP	Zweipunktmaß
Ir	Einzelmessstrecke
LS	Örtliches Maß, festgelegt durch eine Kugel
It	Taststrecke
max	Auslegung der Toleranzgrenze bei der Rauheit
M <sub>i</sub>	Messpunkt 1 an der Stelle i
MMR	Maximum-Material-Bedingung
MRR	Material Removal Required (Materialabtrag erlaubt)
NA	Normenausschuss
N <sub>i</sub>	Messpunkt 2 an der Stelle i
NMR	No Material Removed (Kein Materialabtrag erlaubt)
P <sub>i</sub>	Punkt an der Stelle i
P-Profil	Primärprofil
Pt	Größte Höhe des Primärprofils
Pz	Größte Höhe innerhalb der Einzelmessstrecke des Primärprofils

Ra	Arithmetischer Mittelwert der Profilspitzen
Rku	Steilheit des Rauheitsprofils
Rmr(c)	Materialanteil des Rauheitsprofils
Rp	Höhe der größten Profilspitze innerhalb der Einzelmessstrecke des Rauheitsprofils
RPR	Reziprozitätsbedingung
R-Profil	Rauheitsprofil
Rq	Quadratischer Mittelwert der Profilordinaten
Rsk	Schiefte des Rauheitsprofils
Rsm	Mittlere Rillenbreite
Rt	Größte Höhe des Rauheitsprofils
Rv	Tiefe des größten Profiltals innerhalb der Einzelmessstrecke des Rauheitsprofils
Rz	Größte Höhe innerhalb der Einzelmessstrecke des Rauheitsprofils
S	Sphere (Kugel)
SA	Mittelwert des Rangordnungsmaßes
SCS	Festgelegte Querschnittsfläche
SD	Mittlerer Wert der Spanne des Rangordnungsmaßes
SIM	Oberflächenunvollkommenheit
SM	Median des Rangordnungsmaßes
SN	Kleinstes Rangordnungsmaß
SR	Spanne des Rangordnungsmaßes
SX	Größtes Rangordnungsmaß
TC	Technisches Komitee
TED	Theoretisch genauer Abstand
TPD	Technische Produktdokumentation
TPS	Technische Produktspezifikation

## Abkürzungen

---

U	Upper limit (Obergrenze)
ULS	Höchstmaß
UZ	Ungleich verteilte Toleranz
W-Profil	Welligkeitsprofil
Wt	Größte Höhe des Welligkeitsprofils
Wz	Größte Höhe innerhalb der Einzelmessstrecke des Welligkeitsprofils
Xs	Breite des Profilelements
Zp	Maximale Spitze
Zt	Größte Höhe des Profilelements
Zv	Maximales Tal



## 1 Einleitung

Als „Sprache des Ingenieurs“ bezeichnet, beschreibt das System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation ein umfassendes Regelwerk zur Kommunikation im Maschinenbau, insbesondere bezüglich der geometrischen Eigenschaften von Bauteilen. Schon seit vielen Jahren wird durch Fertigungsmesstechniker diese „Sprache“ mit erforscht und weiterentwickelt, weil sie eine entscheidende Wissensbasis bildet, um die Vorgaben der Produkt- und Prozessentwicklungsbereiche eindeutig interpretieren zu können und Verfahren zum Nachweis aufzeigt. Die Auswahl und Entwicklung von Messverfahren und Messtechnik setzt zudem voraus, dass, wie Professor Trumpold festgestellt hat, die geometrischen Eigenschaften eines Bauteils erst eindeutig definiert werden müssen, was als Ziel der geometrischen Produktspezifikation und –verifikation formuliert ist.

Seit fast 20 Jahren gibt es Bestrebungen, die Vorgehensweisen der geometrischen Spezifikation und Verifikation in dem System der Geometrischen Produktspezifikation und -prüfung (GPS-System) zusammenzufassen und zu strukturieren. Bis heute verändert sich dieses GPS-System jedoch ständig aufgrund der Zusammenführung nationaler und internationaler Normen und neuer Erkenntnisse aus Forschungs- und Entwicklungsarbeiten [Nie12/1, Sri12]. Damit ist bereits zum jetzigen Zeitpunkt eine Komplexität entstanden, die kaum noch beherrscht werden kann, obwohl immer noch deutliche Lücken existieren, um klare, nonverbale und vollständige geometrische Produktspezifikationen zu erstellen und den Konformitätsnachweis nach eindeutigen Regeln durchführen zu können. Eine Ursache für diese Problematik ist in der Verknüpfung der verschiedenen Fachbereiche zu suchen.

Im Maschinenbau werden in Technischen Produktspezifikationen die Anforderungen an ein Produkt bezüglich Funktion, Herstellung und Bewertung definiert, um die verschiedenen Prozesse von der Entwicklung bis zum Recycling eindeutig zu regeln. Technische Produktspezifikationen setzen sich aus unterschiedlichen Dokumenten zusammen, wie z. B. technischen Zeichnungen, Stücklisten, Arbeitsplänen, Montageplänen und Prüfplänen [23605, Ric12]. Üblicherweise werden die Anforderungen an geometrische Eigenschaften von Bauteilen in der geometrischen

Produktspezifikation festgelegt, um die Funktion des Bauteiles zu beschreiben. Fertigungsbedingt entstehen Abweichungen dieser geometrischen Eigenschaften, deren zulässige Grenzen durch Toleranzen festgelegt werden müssen. Der Nachweis, inwieweit diese Grenzen am wirklichen Bauteil eingehalten wurden, erfolgt mit einer messtechnischen Verifikation.

Durch unvollständige geometrische Produktspezifikationen und ungenügende Verifikationsmethoden entscheiden heute die Ausbildung und Erfahrung eines Messtechnikers über die Konformität eines Produktes. Leider wird gerade in diesem Bereich immer weniger in die Ausbildung und Forschung investiert, um Kompetenzen aufzubauen. Somit fehlt es an gut ausgebildeten Mitarbeitern und Methoden, um sinnvolle Entscheidungen über die Erfüllung der Funktionsanforderungen von Bauteilen zu treffen. Unvollständige und unklare Spezifikationen führen darüber hinaus zu Mehrdeutigkeiten, die zu erhöhtem Kommunikationsbedarf, Produktausfällen und zu Produkthaftungsfällen führen können.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Darstellung des Systems der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation und die damit verfolgten Ziele. Die grundlegenden Modelle und Operatoren zur Spezifikation und Verifikation werden erläutert und die Verbindung zur Normung aufgezeigt. Als Handlungsempfehlung zur funktionsgerechten Spezifikation für eindeutige Produktspezifikationen wird ein Spezifikationsmodell aus den heutigen Festlegungen abgeleitet. Die Möglichkeiten und Grenzen des Systems der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation fassen die erarbeiteten Inhalte zusammen und bewerten den zukünftigen Bedarf.

## 2 Problemstellung und Motivation

Die im Lastenheft formulierten funktionalen Anforderungen an ein Produkt werden vom Konstrukteur in einer Technischen Produktspezifikation beschrieben (Bild 1). Diese bildet die Grundlage für die Herstellung und den Konformitätsnachweis des Bauteils, der nach DIN EN 45020 aus dem Jahr 1998 [45020] als „*systematische Untersuchung, inwieweit ein Produkt, ein Prozess oder eine Dienstleistung festgelegte Anforderungen erfüllt*“, definiert ist.

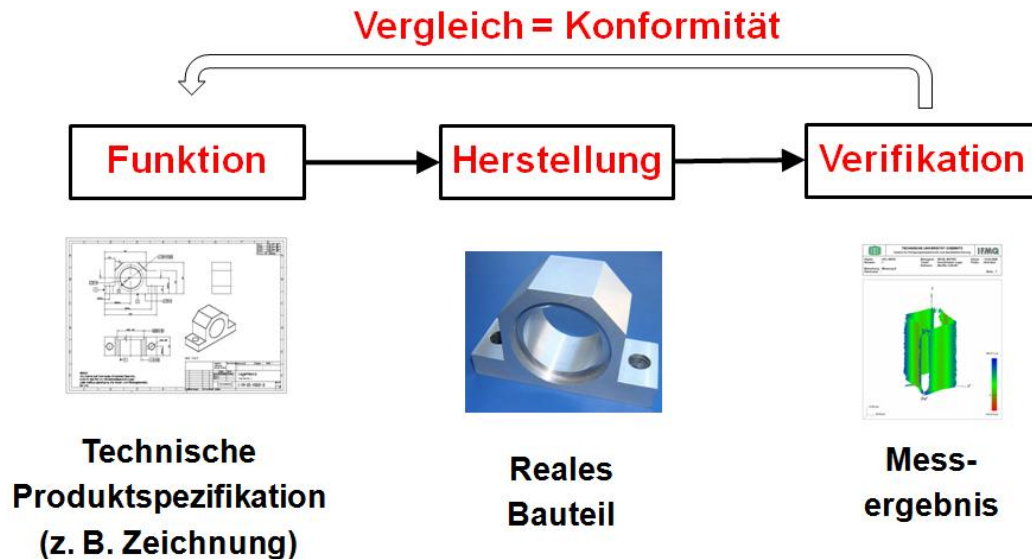
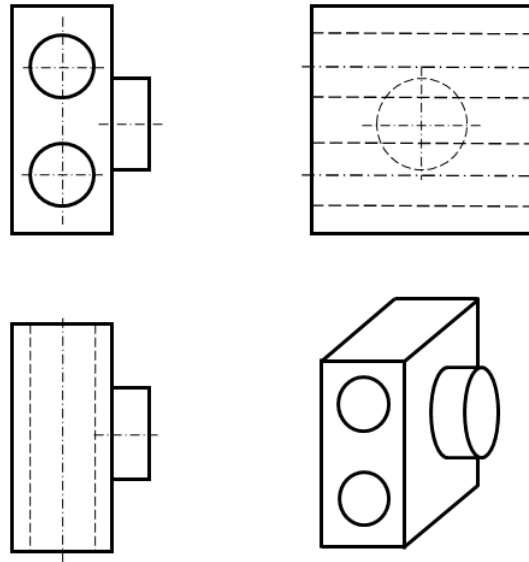


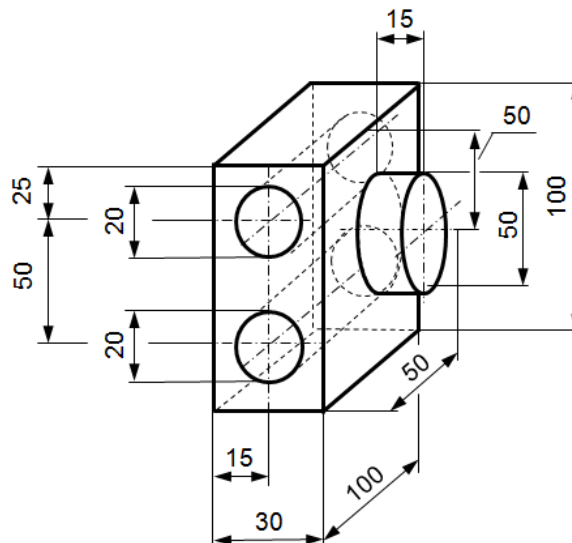
Bild 1: Interaktion Funktion, Herstellung und Verifikation [nach ISOCD, Wec12/1]

Die Technische Produktspezifikation umfasst die Darstellung der Geometrie, heute üblicherweise auch im 3D-Modell, und die Festlegung von Dimensionen mit Toleranzen und Materialeigenschaften, die auf der technischen Zeichnung in der 2D-Ansicht idealgeometrisch eingetragen werden. Beispielhaft ist ein geometrische Modell für ein vereinfachtes Hydraulikventil im Bild 2 dargestellt.



*Bild 2: Darstellung der Geometrie*

Der Konstrukteur legt zusätzlich an diesem idealgeometrischen Modell die Dimensionen des Bauteils durch Längen- oder Winkelangaben (Nennwerte) fest (Bild 3). Die Fertigung des Bauteils führt jedoch zu Abweichungen von dieser Idealgestalt, die durch die Eigenschaften der Herstellprozesse hervorgerufen werden. Deshalb ist es notwendig, Grenzen festzulegen, innerhalb derer die Funktion des Bauteils noch gewährleistet werden kann.



*Bild 3: 3D-Modell mit Nennwerten*

Jedes Bauteil enthält funktionsentscheidende geometrische Eigenschaften, die zur zuverlässigen Funktionserfüllung die Grenzen nicht überschreiten dürfen, und nicht

funktionsrelevante geometrische Eigenschaften, deren Herstellung deshalb ggf. mit geringerem Aufwand ausgeführt werden kann, um Kosten zu sparen. Die Festlegung der zulässigen Grenzen des Bauteils erfordert umfangreiches Wissen u. a. über mechanisches und dynamisches Verhalten von Bauteilen, Materialeigenschaften und Herstellprozesse, um Funktionseigenschaften sicher abzubilden. Die Beschreibung dieser Grenzen kann auf verschiedene Arten erfolgen und wird international durch das System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation (GPS-System) geregelt.

Mit dem GPS-System wird das Ziel verfolgt, ein einheitliches Konzept zur geometrischen Spezifikation aufzubauen, mit dem die an ein Produkt gestellten funktionalen geometrischen Anforderungen eindeutig, vollständig und nonverbal beschrieben werden können. Gleichzeitig soll ein Zusammenhang zu den nachfolgenden Produktphasen aufgebaut werden, um Herstellungs- und Verifikationsmethoden in den Spezifikationsprozess mit einbeziehen zu können. Internationale Normen bilden die Basis des GPS-Systems.

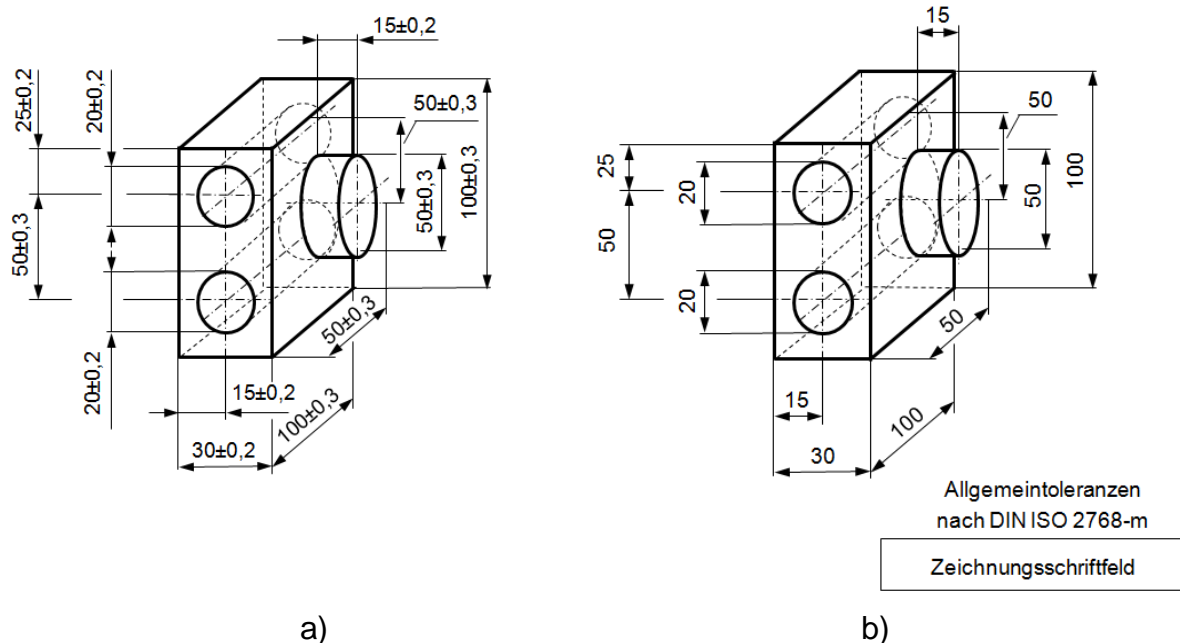
Im GPS-System werden dafür eine symbolisierte Sprache und Regeln entwickelt, die die Kommunikation zwischen den verschiedenen „Welten“ fördern, um die Funktion und Montierbarkeit sowie die Verifikation von Produkten nach der Zeichnungsfreigabe zu garantieren. Zur Vereinfachung des Spezifikationsprozesses tragen Symbolik und Defaultfestlegungen (Standard) bei. In der Übersicht des GPS-Systems [32950] werden die „Welten“ des Produktes unterschieden in:

- Produkt, das sich der Konstrukteur vorstellt,
- hergestelltes Produkt und
- gemessenes Produkt.

Diese Betrachtungsweise ist die Grundlage für die Entwicklung und den Aufbau des GPS-Systems und wird in den Modellen und Operatoren zur Spezifikation und Verifikation wieder aufgegriffen.

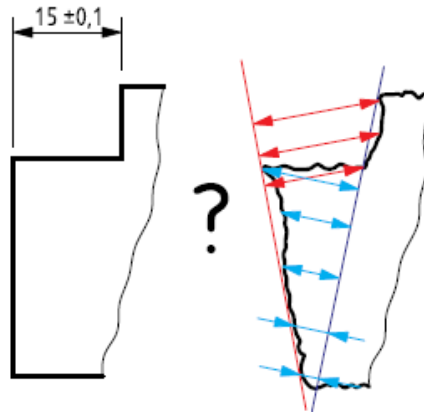
Im Jahr 2012 hat das System der Geometrischen Produktspezifikation und –verifikation eine Komplexität erreicht, die kaum noch zu beherrschen ist. Nur in geringem Maße stehen Konzepte zur Verfügung, diese Spezifikationsmöglichkeiten systematisch und grundlegend zu vermitteln [Nie12, Kle12, Jor11, Hen11, Cha12, Sch12]. Das hat zur Folge, dass die umfangreichen Möglichkeiten nicht genutzt werden und mehrdeutige Spezifikationen Stand der Technik sind.

Die unzureichende Akzeptanz und die begrenzten Lehrkonzepte des GPS-Systems sind gleichzeitig die Ursache für den Einsatz mehrdeutiger Spezifikationstools, wie die Plus-Minus-Toleranz oder Allgemeintoleranzen für Abstände. Beispielhaft soll dieses Defizit veranschaulicht werden. Alle Längenmaße am Bauteil in Bild 4 sind über eine Plus-Minus-Tolerierung begrenzt. Die gleiche Spezifikation ist möglich, indem der Hinweis auf Allgemeintoleranzen entsprechend der Norm DIN ISO 2768 Teil 1 [2768-1] in der Nähe des Schriftfeldes eingetragen wird. Alle Längen-, Winkel- und Kantenmaße auf der technischen Zeichnung ohne eine Toleranzangabe werden mit Toleranzen entsprechend der ausgewählten Toleranzklasse eingeschränkt. Weitere Ausführungen zu den Allgemeintoleranzen enthält Kapitel 5.6.



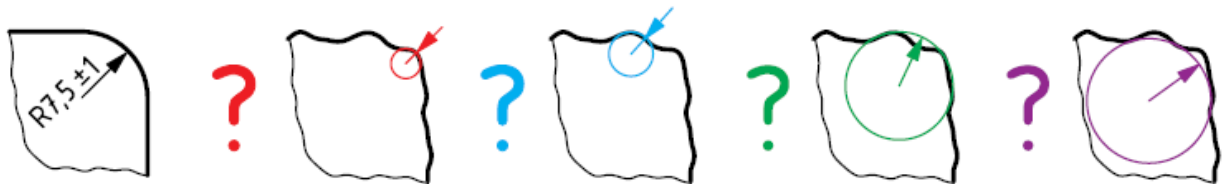
*Bild 4: Längentolerierung nach a) DIN 406 [406-12] und b) mit Allgemeintoleranzen nach DIN EN ISO 2768 Teil 1 [2768-1]*

Werden Abstände und Radien auf diese Art begrenzt, sind mehrere Interpretationen der Toleranz und damit Variationen in der Gestalt des Bauteils möglich, da die Form- und Winkelabweichungen der realen Oberfläche nicht eingeschränkt sind. Bild 5 zeigt auf, welche Abstände aufgrund dieser Spezifikation zulässig sind.



*Bild 5: Interpretation einer Stufentolerierung [Nie12]*

Gleiches gilt für Radien, Kanten und Achsen oder Mittelebenen. Aufgrund der Formabweichungen der Oberfläche in Bild 6 entstehen mehrere Radien. Der Mittelpunkt des Radius ist nicht festgelegt und der Übergang zu den Kanten ist nicht definiert.



*Bild 6: Interpretation der Plus-Minus-Tolerierung eines Radius [Nie12]*

Auch für die Definition einer Kante entstehen durch Formabweichungen am realen Bauteil Mehrdeutigkeiten (siehe Bild 7).

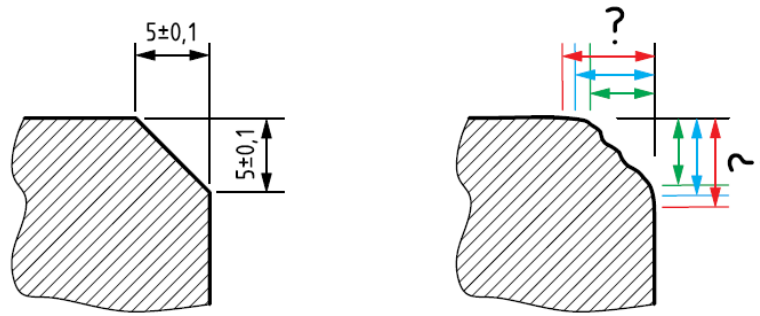


Bild 7: Interpretation der Plus-Minus-Tolerierung einer Kante [Nie12]

Ort und Richtung einer Bohrung, ausgehend von einer Fläche, sind ebenfalls nicht eindeutig, wenn diese Formabweichungen aufweist (Bild 8).



Bild 8: Interpretation der Position einer Bohrungsachse [Nie12]

Das entscheidende Problem dieser Art der Tolerierung liegt in der Unabhängigkeit der einzelnen Festlegungen. Die im geometrischen Modell (Bild 4) scheinbar rechtwinklig zueinanderstehenden Flächen können am wirklichen Bauteil auf verschiedene Arten abweichen, ohne dass die eingetragenen Toleranzen (Bild 9) überschritten werden.

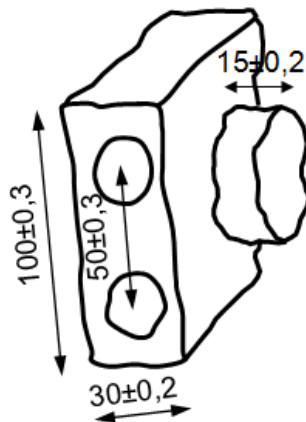


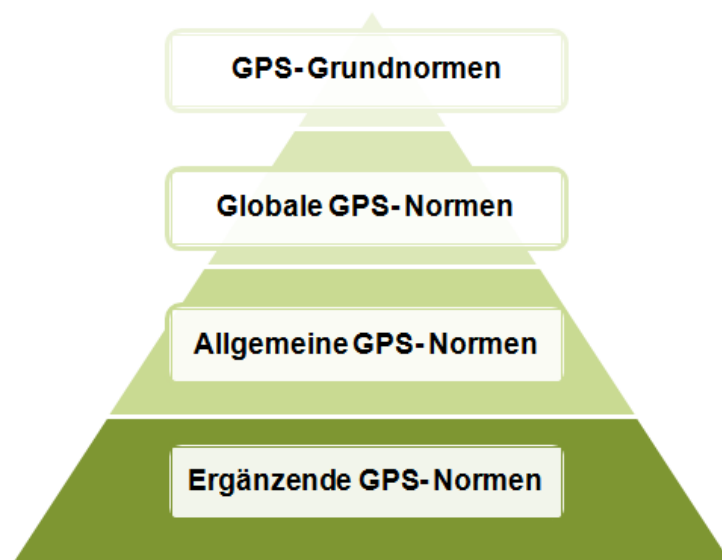
Bild 9: Konsequenzen der Unabhängigkeit der Dimensionen



Eindeutige Spezifikationen verlangen die Festlegung zusätzlicher Einschränkungen, die auf der geometrischen Tolerierung basieren [Nie12, Cha12]. Als geometrische Tolerierung ist die Festlegung von Form-, Richtungs-, Orts-, Lauf-, Welligkeits- und Rauheitstoleranzen beschrieben. Im Gegensatz dazu wird die dimensionale Tolerierung durch die Eintragung von Längen- oder Winkelmaßen geregelt. Im GPS-System sind diese Arten der Tolerierung enthalten und festgelegt.

Bisher erfolgte die Beschreibung des GPS-Systems in zusammenfassender übersichtlicher Weise in der Literatur jedoch nur ansatzweise [Nie12, Hen11, Kle12, Jor11, Hen11, Hen12, Cha12, Sch12, Tru97, Wec01]. Deshalb sollen die Grundlagen und Ziele im Rahmen dieser Arbeit ausführlich behandelt werden. Die Arbeit nutzt im großen Umfang die in den aktuell veröffentlichten Normen abgebildeten Regeln und Festlegungen und nur zur Ergänzung entsprechende Veröffentlichungen.

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich nach der im GPS-System festgelegten Normenhierarchie (Bild 10), die Grundnormen, Globale, Allgemeine und Ergänzende GPS-Normen unterscheidet [32950].



*Bild 10: Normenhierarchie im GPS-System*

Wie in den nachfolgenden Kapiteln aufgezeigt wird, enthalten diese Normen die Grundlagen und Regeln zur Spezifikation geometrischer Eigenschaften. Für eine

Anwendung dieser Möglichkeiten ist jedoch keine systematische Vorgehensweise festgelegt. Ansätze dafür sind in der entsprechenden Literatur zu finden [Lei03, Kle12, Hen11, Jor11, Nie12, Wec12/1], aber derzeit noch nicht ausreichend in die Lehre integriert.

Das Ziel der Arbeit ist daher, aufbauend auf den im GPS-System enthaltenen Regeln und Festlegungen, ein Spezifikationsmodell abzuleiten, mit dem eine funktionsgerechte Spezifikation angeleitet werden kann, die auch die Basis für eine anwendergeführte rechnergestützte Spezifikation bildet. Damit sollen zukünftig die umfangreich eingesetzten CAD-Systeme erweitert werden. Bisher fehlt eine Vielzahl an Spezifikationsmöglichkeiten am 3D-Modell entsprechend dem GPS-System [Ebe12, Cre12, Aut12, Cat12].

## 3 Grundnormen im System der Geometrischen Produktspezifikation und -prüfung

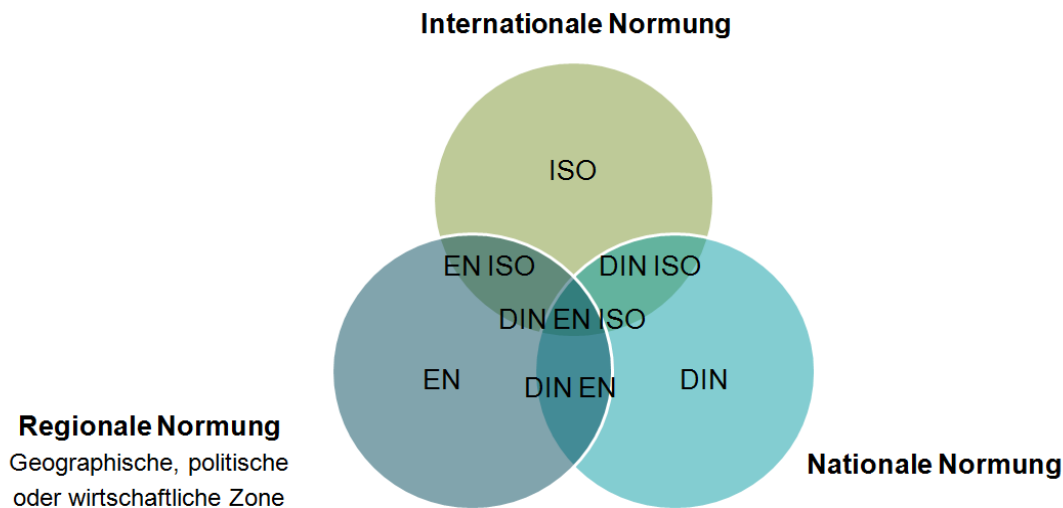
### 3.1 Normung

#### 3.1.1 Allgemeines

Unser Zusammenleben wird durch Normung auf vielfältige Weise geordnet und rationalisiert. Immer wiederkehrende Aufgaben werden durch Normen unter Berücksichtigung der neuesten Erkenntnisse aus Wissenschaft und Technik einheitlich geregelt [Zym12, Har09]. Auch die Verbreitung von technischem Wissen und Innovationen zur Wettbewerbs- und Konkurrenzfähigkeit auf nationaler und internationaler Ebene wird durch die Normung unterstützt [DIN08]. In der DIN 820 Teil 1 sind die Grundsätze der Normung zusammengefasst [820-1]:

- *Freiwilligkeit*: Die Mitarbeit an Normen und die Anwendung von Normen ist freiwillig.
- *Öffentlichkeit*: In Normenausschüssen muss die Kritik beraten werden, die durch die Veröffentlichung von Normenentwürfen durch Nichtbeteiligte an der Norm entstehen kann.
- *Beteiligung aller interessierten Kreise*: An der Normungsarbeit kann sich jeder direkt oder indirekt mit seinem Fachwissen beteiligen.
- *Konsens*: Eine ausgewogene Berücksichtigung aller Interessen durch eine gemeinsame Meinungsbildung wird angestrebt.
- *Einheitlichkeit und Widerspruchsfreiheit*: Eine einheitliche Behandlung der Normungsprodukte ist Grundlage guter Normungsarbeit. Die Normungsprodukte sind sich selbst sowie dem gesamten Regelwerk gegenüber widerspruchsfrei.
- *Ausrichtung am Stand der Wissenschaft und Technik*: Normen sind der dokumentierte Stand der Technik.
- *Wirtschaftlichkeit*: Der Inhalt der Norm soll so kurz wie möglich und so lang wie nötig sein.
- *Ausrichtung am allgemeinen Nutzen*: Der Vorteil des Einzelnen wird dem Nutzen der Allgemeinheit unterstellt.
- *Internationalität*: Normung erfolgt auf nationaler und internationaler Ebene, um einen vereinfachten Welthandel zu ermöglichen.

Die Normung erfolgt in verschiedenen Ebenen (Bild 11).



*Bild 11: Normungsebenen mit Wirkungsbereich der Norm [Ney06]*

Die internationale Normung wird in der Internationalen Organisation für Normung (ISO) geregelt.

### 3.1.2 Internationale Organisation für Normung (ISO)

Aktuell sind in der ISO 163 Länder vertreten. Eine Kategorisierung in feste Mitglieder (111), korrespondierende Mitglieder (47) und Mitglieder mit Beobachtungsstatus (5) findet statt, die genau durch ein Mitglied eines jeden Landes vertreten werden. Die Entwicklung einer nationalen Standardisierungsorganisation entscheidet dabei über die Einordnung. Nur die festen Mitglieder sind aktiv an der Entwicklungsarbeit beteiligt. Die Normungsarbeit wird von Technischen Komitees (TC), welche nach Fachgebieten strukturiert sind, geleistet [DIN08, Har09, ISOM].

Die offiziellen Sprachen der ISO sind Englisch und Französisch, weshalb die ISO-Normen in diesen Sprachen veröffentlicht werden. Für die Übersetzungen sind die nationalen Normungsorganisationen verantwortlich [DIN08].

### 3.1.3 *Europäisches Komitee für Normung (CEN)*

27 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union sowie die Schweiz und die Türkei gehören zum CEN [CENM]. Die Stärkung der europäischen Wirtschaft für den Welthandel mit der Beseitigung von Handelsbarrieren ist das Ziel des CEN [CENA]. Die Mitglieder sind verpflichtet Europäische Normen unverändert in das nationale Normenwerk aufzunehmen. Nationale Versionen der Titelseite, des Vorwortes und des Anhanges bilden die einzigen Änderungen gegenüber den ISO-Normen. Diese Übernahmeverpflichtung beinhaltet auch das Zurückziehen und Ändern nationaler Normen, um Widersprüche zu vermeiden [DIN08].

### 3.1.4 *Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN)*

Das DIN ist ein eingetragener Verein auf ausschließlich gemeinnütziger Grundlage, um Normungsaktivitäten durchzuführen. Mitglied können Firmen, Verbände und alle an der Normung interessierten Körperschaften, Behörden und Organisationen sein, jedoch keine Einzelpersonen [Din08].

Die deutschen Aktivitäten werden in Normenausschüssen (NA) organisiert. Ein Normenausschuss ist für die nationale Normung auf seinem Fach- und Wissensgebiet verantwortlich. Zusätzlich obliegt ihm auf diesem Gebiet die Mitarbeit bei der europäischen und internationalen Normung [DIN08, ISOM]. Die Hauptaufgabe des DIN und der Normenausschüsse besteht darin, Normen zu erarbeiten, anzuerkennen, anzunehmen sowie diese der Öffentlichkeit verfügbar zu machen [DIN08, DINA]. Die Übernahme von ISO-Normen in das deutsche Normenwerk ist in der DIN 820-15 [820-15] geregelt.

Aus diesen Festlegungen kann abgeleitet werden, dass alle Normen, die vor der Nummer die Abkürzung DIN EN ISO aufweisen, in Deutschland gültige Normen sind, die in gleicher Weise auf europäischer und internationaler Ebene veröffentlicht wurden. Inhaltlich sind die Normen identisch. Abweichungen sind im Titel, ergänzenden Vorwort oder im erweiterten Anhang erlaubt.

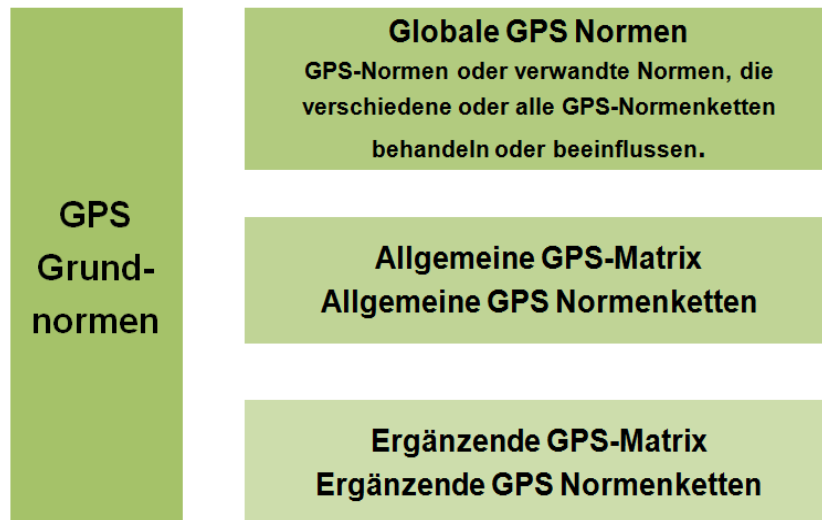
### 3.1.5 ISO/TC 213

Das ISO Technische Komitee (ISO/TC) 213 [TC213], ein Verbund aus verschiedenen Technischen Komitees, ist verantwortlich für die Entwicklung des GPS-Systems. Die Technische Produktdokumentation (TPD) wird im ISO/TC 10 entwickelt und ist eng mit dem ISO/TC 213 verbunden. Zeichnungsrahmen, Schriftarten- und -größen, Linienstärken und Ansichten, auch für das 3D-Modell, werden von diesem TC entwickelt. Das Darstellungsmedium, die Darstellung des Bauteils und die Bemaßung mit den Toleranzen ergeben die Technische Produktspezifikation (TPS). Die Regeln für die Darstellung der Geometrie von Bauteilen werden in der Arbeit nicht behandelt. Die folgenden Ausführungen zeigen auf, welche Normen im ISO/TC 213 für das GPS-System entwickelt wurden.

## 3.2 Aufbau des GPS-Systems - Masterplan

Der Aufbau des Systems ist in englischer Sprache in dem Masterplan Technical Report ISO/TR 14638:1995 Geometrical product specification (GPS) -- Masterplan [14638] und in deutscher Sprache in der Vornorm DIN V 32950:1997 Geometrische Produktspezifikation – Übersicht [32950] beschrieben. Im GPS-Matrixmodell (Bild 12) sind vier verschiedene Arten von Normen festgelegt und zusammengefasst:

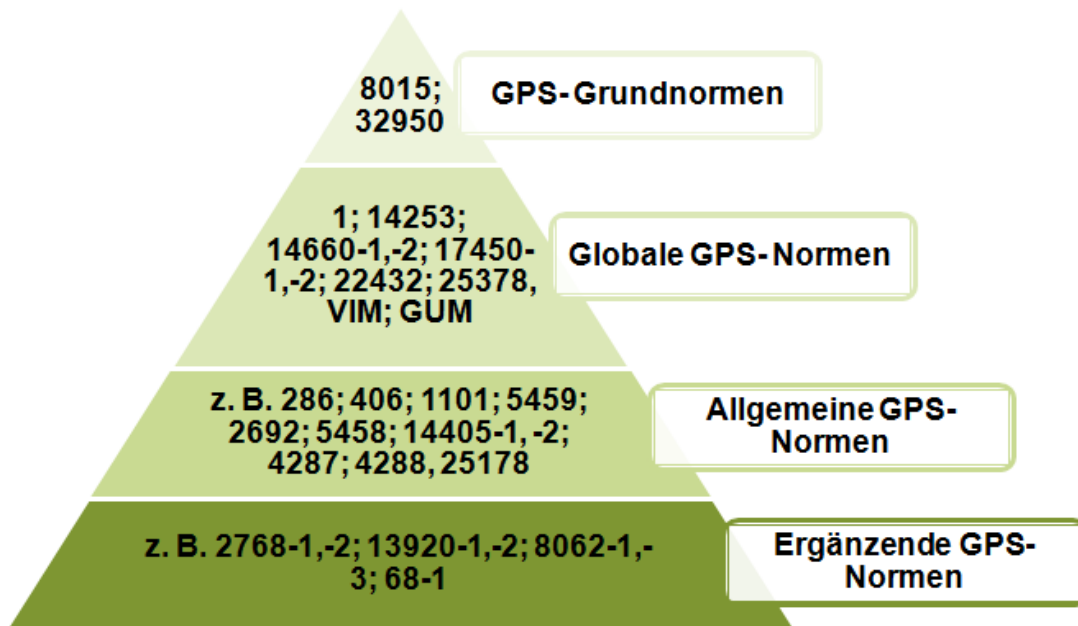
1. **GPS-Grundnormen** umfassen die Grundregeln.
2. **Globale GPS-Normen** definieren globale Begriffe.
3. **Allgemeine GPS-Normen** betrachten die geometrischen Eigenschaften.
4. **Ergänzende GPS-Normen** umfassen Werkstückeigenschaften und Eigenschaften spezieller Maschinenelemente.



*Bild 12: GPS-Matrix Modell [32950]*

Diese Normenarten unterliegen einer Hierarchie (Bild 13), die in DIN EN ISO 8015 [8015] als Grundsatz der Normenhierarchie festgelegt ist. Die Normen eines höheren Niveaus, z. B. die GPS-Grundnormen, gelten auch in den nachfolgenden untergeordneten Niveaus, außer es gibt spezielle Regeln in den Normen eines niedrigeren Niveaus, die diese Regeln außer Kraft setzten.

Bild 13 zeigt eine Zuordnung verschiedener Normen zu den Normenarten in der Normenhierarchie. Die GPS-Grundnormen und Globalen Normen enthalten den Aufbau des GPS-Systems und beschreiben das Konzept. Die Allgemeinen GPS-Normen beziehen sich auf die geometrischen Eigenschaften. Die Ergänzenden GPS-Normen enthalten weitere Regeln und Definitionen für spezifische Fertigungsverfahren und die Geometrie von Maschinenelementen. Die Erarbeitung dieser Normen obliegt anderen Normungsgremien. Die Ergänzenden GPS-Normen werden im Rahmen der Arbeit nicht weiter ausgeführt. Umfangreiche Hinweise zu den Normen, die im GPS-System entwickelt wurden, enthält die Vornorm DIN V 32950:1997 Geometrische Produktspezifikation – Übersicht [32950].



*Bild 13: Normenhierarchie mit Zuordnung der Normennummer zu den Normenarten  
[nach 8015 und Cha12]*

Die Allgemeine GPS-Matrix ordnet die Allgemeinen GPS-Normen und enthält eine Zusammenstellung von geometrischen Eigenschaften und Kettengliedern, die eine Einordnung von Normen zu einem bestimmten Anwendungsgebiet für die entsprechende geometrische Eigenschaft ermöglichen (siehe Tabelle 1). Den Aufbau der Allgemeinen GPS-Matrix zeigt Tabelle 1.



Tabelle 1: Aufbau der Allgemeinen GPS-Matrix [32950]

Kettengliednummer	1	2	3	4	5	6
Geometrische Eigenschaften	Angaben der Produkt-dokumenten-codierung	Definition der Toleranzen – Theoretische Definition der Werte	Definition der Eigenschaften des Istform-elementes	Ermittlung der Abweichungen des Werkstückes	Anforderungen an Messeinrichtungen	Kalibrieranforderungen - Kalibrier normen
1. Größenmaß						
2. Abstand						
3. Radius						
4. Winkel						
5. Form einer Linie bezugsunabhängig						
6. Form einer Linie bezugsabhängig						
7. Form einer Oberfläche bezugsunabhängig						
8. Form einer Oberfläche bezugsabhängig						
9. Richtung						
10. Ort						
11. Lauf						
12. Gesamtlauf						
13. Bezüge						
14. Rauheitsprofil						
15. Welligkeitsprofil						
16. Primärprofil						
17. Oberflächen-defekte						
18. Kanten						

Ziel der Normung ist es, jedes einzelne „Matrixkästchen“ der Allgemeinen GPS-Matrix mit mindestens einer Norm zu füllen. Alle zusammenhängenden Normen für eine geometrische Eigenschaft werden als Normenkette bezeichnet [32950]. Die

Kettenglieder regeln die Anforderungen bezüglich der geometrischen Eigenschaft. Die Kettenglieder eins bis drei betreffen die Spezifikation und enthalten:

*1. Angaben der Produktdokumenten-Codierung*

Das Kettenglied enthält alle Normen zur Eintragung der geometrischen Eigenschaft, insbesondere durch Symbole, in der technischen Zeichnung.

*2. Definition der Toleranzen – Theoretische Definitionen und Werte*

Im Kettenglied 2 werden die Toleranzwerte und Toleranzzonen beschrieben.

*3. Definitionen der Eigenschaften des Istformelements oder Kenngrößen*

Das theoretisch ideale Element soll durch Erweiterungen widerspruchsfrei definiert werden. Die Eigenschaften des Istformelements beruhen auf erfassten Daten.

Zur Verifikation sind die Kettenglieder vier bis sechs festgelegt:

*4. Ermittlung der Abweichungen des Werkstücks – Vergleich mit Toleranzgrenzen*

Diese Normen regeln die Aufnahme von Messwerten, die Filterung und Zuordnung, um einen Vergleich mit den Angaben auf der technischen Zeichnung durchführen zu können. Sie legen fest, wie der Vergleich zu erfolgen hat.

*5. Anforderungen an Messeinrichtungen*

Die Beschreibung der Messgeräteeigenschaften für die geometrischen Eigenschaften ist in den Normen dieses Kettengliedes festgelegt.

*6. Kalibrieranforderungen – Kalibriernormen*

Das letzte Kettenglied regelt die Kalibrierung. Festlegungen zu Normalen und Kalibrierverfahren werden für die verschiedenen Messgeräte und geometrischen Eigenschaften festgelegt.

Die Entwicklung der Normen zur Beschreibung der geometrischen Eigenschaften soll unter Berücksichtigung der drei folgenden Grundsätze erfolgen:

**Grundsatz der Widerspruchsfreiheit**

Jede Normenkette muss die Widerspruchsfreiheit zwischen der Eintragung in der technischen Zeichnung und der wirklich am Bauteil vorhandenen geometrischen Eigenschaften gewährleisten und auf internationale Kalibriernormen rückführbar sein.

**Grundsatz der Vollständigkeit**

Die Allgemeine GPS-Matrix muss die verschiedenen Möglichkeiten enthalten, alle geometrischen Eigenschaften in die technische Zeichnung einzutragen.

**Grundsatz der Ergänzung**

Die Normenketten müssen sich untereinander ergänzen. Die einzelnen Anforderungen in einer technischen Zeichnung dürfen sich nicht überschneiden.

Neben dem Masterplan enthält die DIN EN ISO 8015 weitere Grundlagen auf der Stufe einer GPS-Grundnorm.

**3.3 Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln - ISO 8015****3.3.1 Grundlegendes**

Die Veröffentlichung der GPS-Grundnorm DIN EN ISO 8015 [8015] im Jahr 2011 stellt einen wichtigen Beitrag zur Interpretation von Technischen Produktspezifikationen im Sinne des GPS-Systems dar. Grundlegende Annahmen zu den Funktionsgrenzen, Toleranzgrenzen und dem Funktionsniveau des Werkstückes wurden erstmalig zur Interpretation von Technischen Produktspezifikationen in dieser Norm formuliert. Sie beeinflusst alle anderen GPS-Normen und jede andere Art von Dokument innerhalb des GPS-Systems.

Entsprechend dieser Norm sind die Grenzen der Funktionsfähigkeit eines Werkstückes als Toleranzgrenzen in der Technischen Produktspezifikation eingetragen, die durch Untersuchungen ermittelt wurden und ohne Unsicherheit bekannt sind. Innerhalb der Toleranzgrenzen funktioniert das Werkstück zu 100%, außerhalb zu 0%.

Ein weiterer wesentlicher Fortschritt der Norm ist die Formulierung der folgenden 13 elementaren Grundsätze, die die Möglichkeiten der Mehrdeutigkeit von TPS reduzieren. Es wird unterschieden zwischen:

### *3.3.2 Grundsatz des Aufrufens (Invokationsprinzip)*

Mit dem Grundsatz des Aufrufens wird festgelegt, dass die Verwendung eines Teils des GPS-Systems, z. B. eine Norm, Regel oder Angabe, automatisch zur Gültigkeit des gesamten GPS-Systems führt. Dies kann nur ausgeschlossen werden, wenn ein spezieller Hinweis auf eine andere Norm oder ein anderes Regelwerk, z. B. eine firmeneigene Richtlinie, auf der technischen Zeichnung eingetragen ist.

### *3.3.3 Grundsatz der GPS-Normenhierarchie*

Der Grundsatz der GPS-Normenhierarchie regelt, dass die GPS-Normen einer Hierarchie, wie sie im Bild 10 dargestellt ist, unterliegen. Die Normen des höheren Niveaus gelten auch bei Anwendung der Normen eines niederen Niveaus, außer es sind explizit andere Regeln in den Normen des niederen Niveaus angegeben, die die Festlegungen in den Normen des höheren Niveaus ersetzen.

### *3.3.4 Grundsatz der bestimmenden Zeichnung*

Der Grundsatz der bestimmenden Zeichnung definiert, dass nur Forderungen an ein Werkstück, die auf der technischen Zeichnung oder in den Technischen Produktdokumenten festgelegt sind, geltend gemacht werden können. Das schließt alle Default GPS-Spezifikationen mit ein, wenn durch den Grundsatz des Aufrufens das gesamte GPS-System gilt.

### *3.3.5 Grundsatz des Geometrieelementes*

Mit dem Grundsatz des Geometrieelementes wird im GPS-System festgelegt, dass jedes Werkstück aus einzelnen Geometrieelementen, die voneinander abgegrenzt sind und eine Beziehung zueinander haben, zusammengesetzt ist. Jede GPS-Spezifikation gilt standardmäßig für ein einziges Geometrieelement und eine einzige Beziehung zwischen Geometrieelementen und für das gesamte Geometrieelement, außer es wird

ausdrücklich etwas anderes im oder in der Nähe des Schriftfeldes in der technischen Zeichnung festgelegt.

### 3.3.6 Grundsatz der Unabhängigkeit

Der Grundsatz der Unabhängigkeit legt standardmäßig für alle Spezifikationen fest, dass die Eigenschaften eines Geometrieelementes oder eine Beziehung zwischen Geometrieelementen unabhängig von anderen Anforderungen an das Geometrieelement oder die Beziehung zwischen den Geometrieelementen erfüllt werden muss. Diese Regel wird ungültig, wenn mit einer anderen Norm oder besonderen Angaben ausdrücklich eine Abhängigkeit gefordert wird. Die Unabhängigkeit wird z. B. durch die Hüllbedingung für Größenmaßelemente [14405-1] oder die gemeinsame Zone [1101] als Anforderung für mehr als ein Geometrieelement aufgehoben.

### 3.3.7 Grundsatz der Dezimaldarstellung

Der Grundsatz der Dezimaldarstellung regelt, dass nicht angegebene Dezimalstellen in Normen oder auf technischen Zeichnungen als Nullen interpretiert werden müssen.

### 3.3.8 Grundsatz der Standardfestlegung (Defaultprinzip)

Der Grundsatz der Standardfestlegung bezieht sich auf das Konzept der GPS-Spezifikation über den Spezifikationsoperator. Ausführlich wird dieses Konzept im Kapitel 4.2.2 beschrieben. Bei diesem Grundsatz wird noch einmal unterstrichen, dass mit der GPS-Grundspezifikation ein vollständiger Spezifikationsoperator festgelegt wird, bei dem die Definition der geometrischen Eigenschaften auf den Defaultspezifikationsoperatoren beruht. Auf der technischen Zeichnung erfolgt kein ausdrücklicher Hinweis auf diese Spezifikationsoperatoren.

### 3.3.9 Grundsatz der Referenzbedingung

Mit diesem Grundsatz ist festgelegt, dass alle GPS-Spezifikationen bei den im GPS-System festgelegten Referenzbedingungen gelten. Die ISO 1 [1] legt z. B. die Referenztemperatur von 20°C fest.

### *3.3.10 Grundsatz des starren Werkstücks*

Ein starres Werkstück bedeutet, dass keinerlei Verformungen an dem Werkstück durch Kräfte oder die Schwerkraft angenommen werden. Es wird festgelegt, dass das Werkstück eine unendliche Steifigkeit aufweist und alle GPS-Spezifikationen auf diesem Zustand beruhen.

### *3.3.11 Grundsatz der Dualität (Spezifikation, Verifikation)*

Mit dem Operatorkonzept sind im GPS-System der Spezifikations- und Verifikationsoperator eingeführt worden. Die Erläuterung des Operatorkonzeptes enthält Kapitel 4.2. Der Grundsatz der Dualität gibt an, dass der Spezifikationsoperator unabhängig von Messverfahren und -geräten und damit dem Verifikationsoperator festgelegt wird. Für den Nachweis der geometrischen Eigenschaften des Werkstückes wird der Verifikationsoperator festgelegt, der unabhängig vom Spezifikationsoperator ist, aber den Spezifikationsoperator widerspiegeln soll. Die zulässige Auswahl des Verifikationsoperators soll in Abhängigkeit der damit entstehenden Unsicherheit gegenüber dem Spezifikationsoperator und der entstehenden Mehrdeutigkeit der Spezifikation erfolgen. Das Konzept der Unsicherheiten beinhaltet Kapitel 4.7.

### *3.3.12 Grundsatz der Funktionsbeherrschung*

Der Grundsatz der Funktionsbeherrschung drückt aus, dass die Funktion mit dem Spezifikationsoperator nicht vollständig nachgebildet werden kann und somit immer eine Mehrdeutigkeit in der Spezifikation gegenüber der Funktion vorhanden ist.

### *3.3.13 Grundsatz der allgemeinen Spezifikation*

Der Grundsatz der allgemeinen Spezifikation greift den Grundsatz des Geometrieelementes wieder auf, der besagt, dass die GPS-Spezifikationen nur für einzelne Geometrieelemente oder Beziehungen zwischen Geometrieelementen gelten. Es wird weiterhin damit festgelegt, dass eine allgemeine GPS-Spezifikation nur für das Merkmal eines Geometrieelementes oder eine Beziehung zwischen Geometrieelementen gilt, für die keine individuelle GPS-Spezifikation der gleichen Art angegeben wurde. Bei widersprüchlichen Angaben ist in den allgemeinen Regeln für die

Mehrdeutigkeit der Spezifikation gefordert, dass entweder zusätzliche Erklärungen einzufügen sind oder nur die toleranteste GPS-Spezifikation einzuhalten ist.

#### *3.3.14 Grundsatz der Verantwortlichkeit*

Der Konstrukteur ist verantwortlich für die Festlegung des Spezifikationsoperators. Neben den Grenzen des GPS-Systems entscheiden seine Fähigkeiten und Kenntnisse über den Grad der Mehrdeutigkeit der Funktions- und Spezifikationsbeschreibung. Mit dem Grundsatz der Verantwortlichkeit wird dem Konstrukteur die Verantwortung für die Mehrdeutigkeit eindeutig zugewiesen. Der Grad der Annäherung des Verifikationsoperators an den Spezifikationsoperator wird von der Messunsicherheit bestimmt. Die Verantwortung für die Messunsicherheit übernimmt, gemäß der Norm DIN EN ISO 14253 Teil 1 [14253-1], derjenige, der den Nachweis der Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit der Spezifikationen führt. Entsprechend dieser Norm wird unterschieden zwischen dem Nachweis durch den Hersteller oder Kunden.

Zum besseren Verständnis des GPS-Systems und der grundlegenden Konzepte werden die Modelle und Operatoren in den Globalen GPS-Normen definiert.

## 4 Globale GPS-Normen

### 4.1 Grundlegende Modelle

#### 4.1.1 Zusammenhang zwischen Modellen und Operatoren

Im GPS-System wird das Konzept der Spezifikation und Verifikation an verschiedenen Modellen und Operatoren beschrieben. Die Modelle sind definiert [17450-1, 22432] als die *„Menge der physikalischen Grenzen des virtuellen und wirklichen Werkstückes“*.

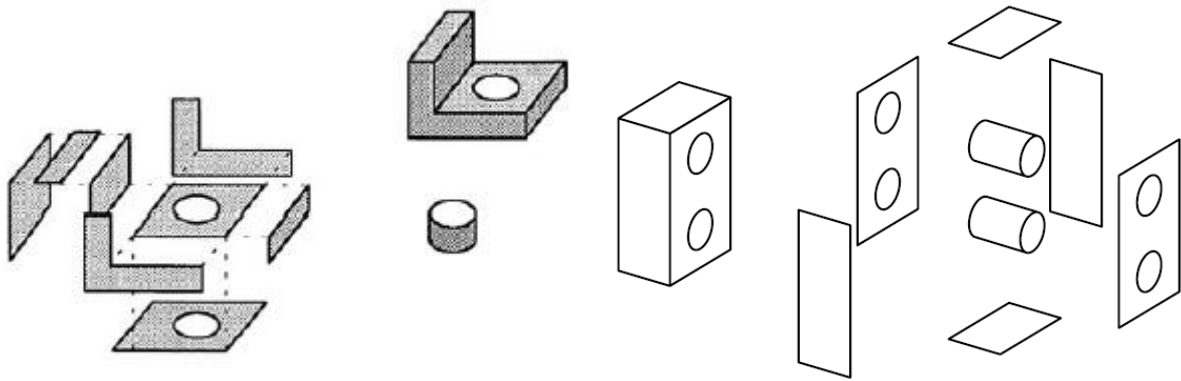
Prinzipiell wird zwischen dem Spezifikations- (Kapitel 4.2.2) und dem Verifikationsoperator (Kapitel 4.2.3) unterschieden. Diese Operatoren sind durch die Ausführung von Operationen an Geometrieelementen (Kapitel 4.4) in einer festgelegten Reihenfolge definiert [17450-2(D), Nie12]. Unvollständige Spezifikations- und Verifikationsoperatoren führen zu Unsicherheiten bei der Erfüllung der funktionalen Anforderungen, die im Kapitel 4.7 weiter ausgeführt werden.

#### 4.1.2 Nennmodell

Die Spezifikation geometrischer Eigenschaften im Rahmen des Systems der Geometrischen Produktspezifikation und –verifikation ist über die Festlegung der Nenngestalt und deren zulässige Grenzen geregelt. Im Entwicklungsprozess wird nach der Konzeptphase eines Produktes ein geometrisches Modell erstellt [Zha11], um die funktionalen Anforderungen und zulässigen Grenzen definieren zu können. Die Nenngestalt entspricht dem Nennmodell [17450-1] oder nominalen Modell [22432], das zunächst nur Nennwerte enthält und von perfekter Gestalt ist (Bild 15). Es wird als *„eine zusammenhängende Oberfläche, die aus einer unendlichen Anzahl von Punkten besteht“*, definiert [22432].

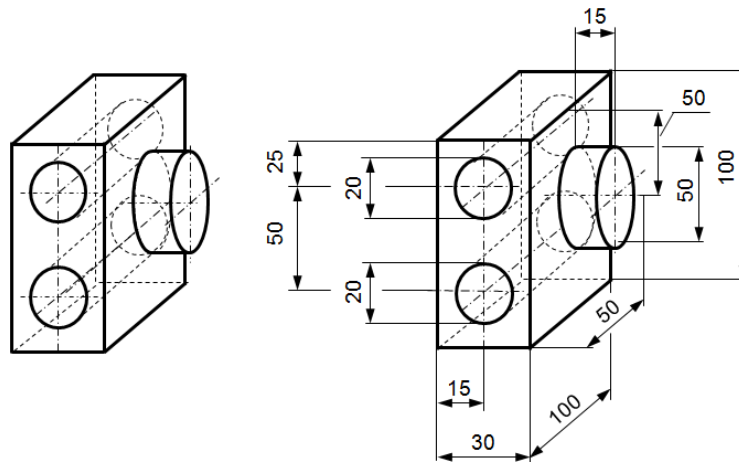
Der größte Anteil der Bauteile setzt sich aus Standardgeometrieelementen zusammen, die auf verschiedene Art und Weise miteinander kombiniert werden (Bild 14) [Wec12]. Als Standardgeometrieelemente werden z. B. Ebene, Zylinder und Torus bezeichnet. Alternativ werden Bauteile auch über Geometrieelemente beschrieben, die durch mathematische Funktionen abgebildet sind. Dazu gehören Freiformflächen, Schraubenlinien oder Zahnräder [Wec12].





*Bild 14: Beispiele für die Modellierung der Nenngestalt aus Standardgeometrieelementen [Zha11, Nie12]*

Am Modell können einzelne Elemente, eine Menge von Elementen und/oder Teile von (Geometrie) Elementen festgelegt werden [22432]. In der Globalen GPS-Norm DIN EN ISO 17450-1 [17450-1] sind Oberflächenmodelle, die mathematischen Grundlagen des Konzeptes, die den Modellen zugeordnet sind, und die allgemeinen Begriffe für geometrische Elemente von Werkstücken festgelegt. Ausgehend von den funktionalen Anforderungen an das Produkt soll damit die geometrische Spezifikation, die auch die zulässigen Abweichungen festlegt, vom Konstrukteur definiert werden können.



*Bild 15: Nennmodell und Nennmodell mit Nennwerten [Die12]*

Das Nennmodell existiert nur als virtuelles (imaginäres) Modell in einem CAD-System oder auf einer technischen Zeichnung [Nie12]. Im GPS-System wird dem Konstrukteur, als Hilfestellung für die Definition der zulässigen funktionalen Grenzen der

geometrischen Gestalt, das mit möglichen Abweichungen behaftete, nicht-ideale Oberflächenmodell zur Verfügung gestellt.

#### 4.1.3 Nicht-ideales Oberflächenmodell (Hautmodell)

Das nicht-ideale Oberflächenmodell, auch bezeichnet als Hautmodell, ist ebenfalls ein virtuelles (imaginäres) Modell [Nie12], das die physikalische Grenzfläche gegenüber der Umwelt [17450-1] mit geometrischen Abweichungen und damit nicht-idealer Geometrie [22432] beschreibt. Ein nicht-ideales Oberflächenmodell für das Nennmodell (Bild 15) ist in Bild 16 dargestellt. Auch das nicht-ideale Oberflächenmodell ist eine zusammenhängende Oberfläche mit einer unendlichen Anzahl von Punkten [22432].



*Bild 16: Nicht-ideales Oberflächenmodell (Hautmodell)*

Welche Art und Dimension die Abweichungen des nicht-idealen Oberflächenmodells gegenüber dem Nennmodell haben, ist abhängig von den Kenntnissen des Konstrukteurs über die Möglichkeiten der Abweichung und die Grenzen der Herstellverfahren. Die Eigenschaften des nicht-idealen Oberflächenmodells sind damit eng mit den für die Herstellung ausgewählten Fertigungsverfahren und den noch zulässigen Grenzen der geometrischen Eigenschaften aus funktionaler Sicht verknüpft.

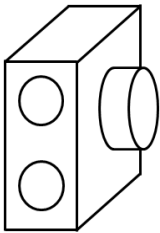
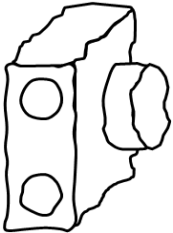
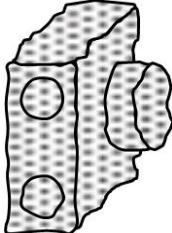
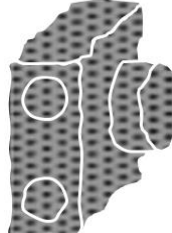

Für die geometrische Spezifikation soll das nicht-ideale Oberflächenmodell genutzt werden, um die maximal zulässigen Grenzwerte der geometrischen Eigenschaften festzulegen [17450-1].

#### 4.1.4 Diskretes und abgetastetes Oberflächenmodell

Im Jahr 2011, mit der Veröffentlichung der Norm ISO 22432 (Übersetzung und Veröffentlichung als DIN EN ISO 22432 [22432] im Jahr 2012) *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Zur Spezifikation und Prüfung benutzte Geometrieelemente*, wurden zusätzlich zum bis dahin veröffentlichten Nennmodell und nicht-idealen Oberflächenmodell das diskrete und abgetastete Oberflächenmodell definiert. Diese Modelle wurden eingeführt, um die Spezifikation und Verifikation eindeutiger festlegen zu können.

Beide Modelle sind das Ergebnis der Extraktion (siehe Kapitel 4.4.3) einer endlichen Anzahl von Punkten. Beim diskreten Oberflächenmodell werden die Punkte auf dem nicht-idealen Oberflächenmodell erfasst. Das abgetastete Oberflächenmodell wird als punktweise, physikalisch mit Koordinatenmessgeräten auf der realen Oberfläche erfasste Oberfläche beschrieben [22432]. In der Tabelle 2 sind die verschiedenen Modelle gegenübergestellt. Die reale Oberfläche ist für die Darstellung vereinfacht als Fläche gezeigt.

*Tabelle 2: Bild der wirklichen Oberfläche und der Oberflächenmodelle [nach 22342]*

Bezeichnung	Nennmodell	Nicht-ideales Oberflächenmodell	Diskretes Oberflächenmodell	Abgetastetes Oberflächenmodell	Reale Oberfläche eines Bauteils
Bildliche Darstellung					

Mit Hilfe der Modelle wird die Festlegung der Operatoren für die Spezifikation und Verifikation vereinfacht.

## **4.2 Grundlegende Operatoren**

### *4.2.1 Funktionsoperator*

Aktuell sind im GPS-System der Funktionsoperator, der Spezifikationsoperator und der Verifikationsoperator definiert [17450-2(D)]. Der Überblick über die Operatoren im Zusammenhang zu den Operationen und der Unsicherheit (Bild 17) ist dem Normenentwurf der DIN EN ISO (E) 17450 Teil 2 aus dem Jahr 2009 [17450-2(D)] entnommen. Aktuell ist die Norm in der Veröffentlichungsphase, aber noch nicht in deutscher Sprache verfügbar. Grundlegende Änderungen wurden nicht vorgenommen. Hauptsächlich werden verschiedene Begriffe entsprechend den aktuellen Übersetzungsregeln angepasst [17450-2(I)]. Die Anlage 1 enthält eine Liste mit den derzeit genutzten Übersetzungsregeln und den bisher, teilweise auch noch in dieser Arbeit, verwendeten Begriffen.

Der Funktionsoperator ist ein Operator, der mit der Funktion des Werkstückes ideal übereinstimmt, aber nicht formal ausgedrückt werden kann [17450-2(D)]. Mit der Einführung des Funktionsoperators wird ein Vergleich zwischen der tatsächlichen Funktion und deren Abbildung durch den Spezifikations- und Verifikationsoperator möglich. Ziel ist es, den Unsicherheitsbeitrag abschätzen zu können, der sich zwischen dem Funktionsoperator und dem Spezifikations- und Verifikationsoperator ergibt.

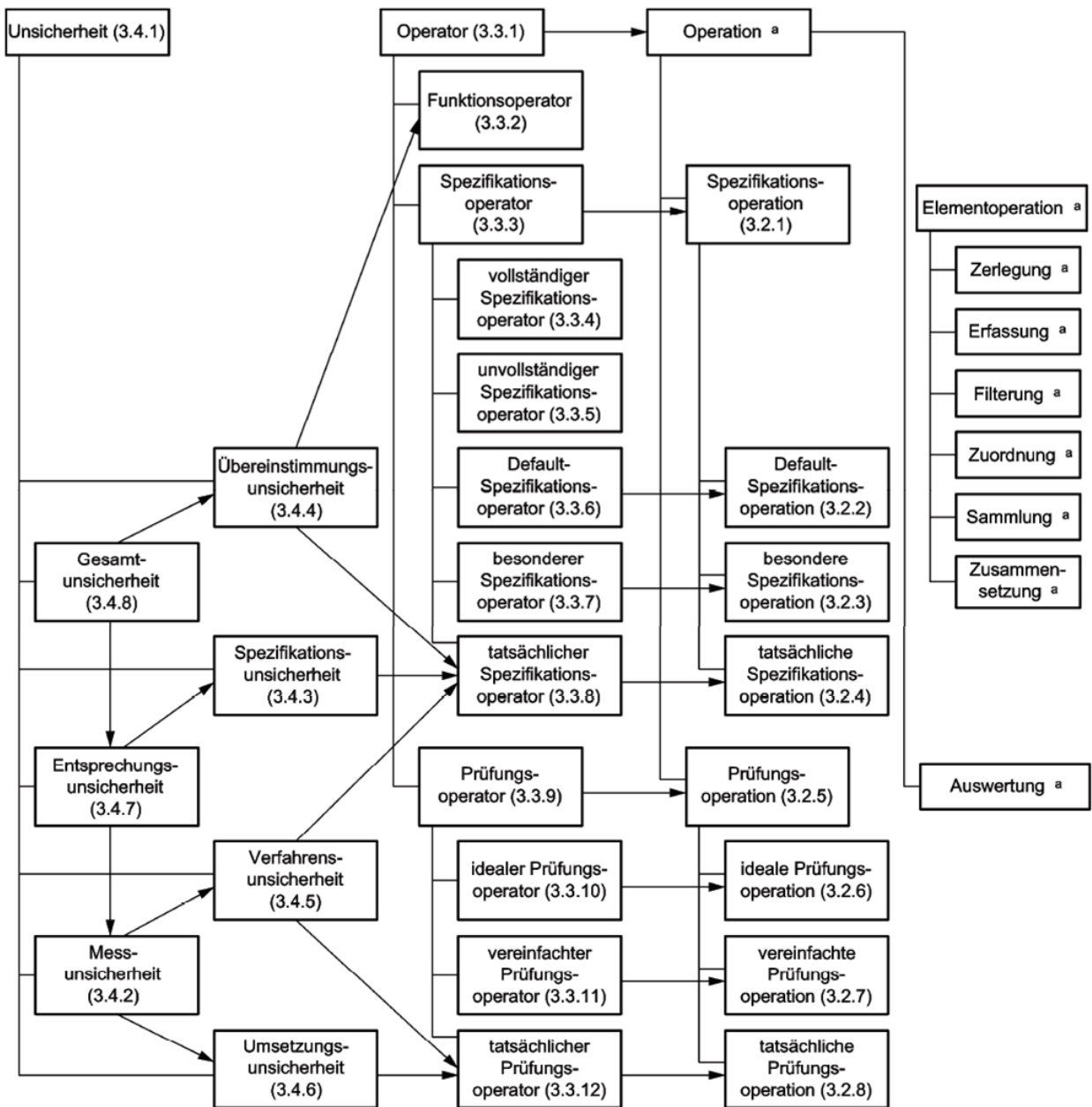


Bild 17: Konzeptdiagramm für Operationen, Operatoren und Unsicherheiten [17450-2(D)]

Das Konzept des Spezifikations- und Verifikationsoperators ist detailliert in den GPS-Normen ausgearbeitet.

#### 4.2.2 Spezifikationsoperator

Die Spezifikation auf der technischen Zeichnung erfolgt nach festgelegten Regeln und wird mit der Angabe von Default- und speziellen Spezifikationsoperatoren vereinfacht

[8015]. Zur Reduzierung der Angaben auf der technischen Zeichnung oder in der Technischen Produktspezifikation werden GPS-Spezifikationselemente verwendet. Sie steuern einen geordneten Satz von Spezifikationsoperationen, z. B. mit einem grafischen Symbol [17450-2(D)].

Beispielhaft sind GPS-Spezifikationselemente für die Spezifikation der Rauheit und einer Positionstoleranz im Bild 18 dargestellt. Mit dem Symbol für die Rauheit sind Vorgaben für die Operationen Partition, Extraktion, Filterung und Assoziation als Defaultfestlegungen im GPS-System beschrieben (siehe Kapitel 5.8.3). Für die Positionstoleranz fehlen diese Defaultfestlegungen, um die im Toleranzrahmen festgelegt Anforderungen nachweisen zu können. Die Interpretation der Angaben im Toleranzrahmen wird in den Kapiteln 5.3 und 5.5.2 geklärt. Die ausführliche Erläuterung der genannten Operationen erfolgt unter Kapitel 4.3.

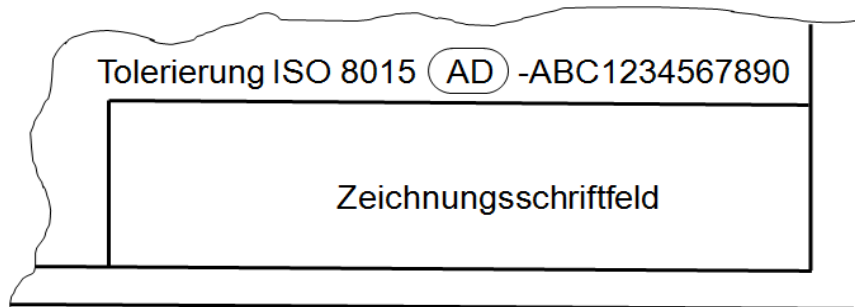


*Bild 18: Beispiele für GPS-Spezifikationselemente*

Die GPS-Spezifikation enthält mehrere GPS-Spezifikationselemente, die zusammen den Spezifikationsoperator steuern. Mit dem Spezifikationsoperator erfolgt die formale Beschreibung der Funktionseigenschaften des Bauteils. Die kürzeste Möglichkeit, eine GPS-Spezifikation anzugeben, wird als GPS-Grundspezifikation [17450-2(D)] oder grundlegende GPS-Spezifikation [8015] bezeichnet. Die GPS-Grundspezifikation enthält die Defaultfestlegungen für die Spezifikation.

Die in der GPS-Grundspezifikation festgelegten Defaults sind nicht immer in der technischen Zeichnung ersichtlich. Mit der Eintragung eines Größenmaßes, z. B.  $\varnothing 30H6$ , ist als Default festgelegt, dass die Regeln der DIN EN ISO 14405 Teil 1 [14405-1] anzuwenden sind. Damit wird dieses Größenmaß als Zweipunktmaß betrachtet. Mit Spezifikationsmodifikatoren können diese Defaultfestlegungen geändert werden, die

dann als besondere GPS-Spezifikation [17450-2(D)] oder spezielle GPS-Spezifikation [8015] bezeichnet werden. Die Festlegung einer speziellen GPS-Spezifikation kann durch Modifikatoren des GPS-Systems oder firmeneigene Regeln erfolgen [8015]. Zur Kennzeichnung eines abgewandelten Default GPS-Spezifikationsoperators müssen auf der technischen Zeichnung (siehe Bild 19) mindestens das Wort „Tolerierung“, das Symbol AD (eingerahmt), als Abkürzung für „abgewandelter Standard“ (englisch Altered Default), und der Verweis auf das entsprechende Dokument oder die Information eingetragen sein.



*Bild 19: Eintragung eines abgewandelten GPS-Spezifikationsoperators [8015]*

Im GPS-System wird zwischen verschiedenen Spezifikationsoperatoren und den zugehörigen Operationen unterschieden. Die Gegenüberstellung der Definitionen des Normenentwurfs DIN EN ISO 17450 Teil 2 [17450-2(D)] enthält die Tabelle 3.

Ziel der Spezifikation ist die Festlegung des vollständigen Spezifikationsoperators, der alle notwendigen Spezifikationsoperationen enthält. Im Falle eines unvollständigen Spezifikationsoperators entstehen Unsicherheiten (siehe Kapitel 4.7), die sich auf die Verifikation und Funktionserfüllung auswirken können.

*Tabelle 3: Übersicht der Definitionen der Spezifikationsoperatoren und -operationen mit Verweis auf die Normenkapitel [17450-2(D)]*

	<b>-operator</b>	<b>-operation</b>
<b>Spezifikations-</b>	(3.3.3) „geordneter Satz von Spezifikationsoperationen (3.2.1).“	(3.2.1) „Operation, bei dessen Formulierung nur mathematische oder geometrische Ausdrücke oder Algorithmen genutzt werden.“
<b>Vollständiger Spezifikations-</b>	(3.3.4) „Spezifikations-operator (3.3.3) basierend auf einem Satz vollständig definierter Spezifikationsoperationen (3.2.1) in einer definierten Reihenfolge“	-
<b>Unvollständiger Spezifikations-</b>	(3.3.5) „Spezifikations-operator (3.3.3) mit einem oder mehreren fehlenden oder unvollständig definierten oder in einer unvollständig definierten Reihenfolge vorliegenden Spezifikationsoperationen (3.2.1)“	-
<b>Default-Spezifikations-</b>	(3.3.6) „Spezifikations-operator, der nur Default-Spezifikationsoperationen (3.2.2) in der Default-Reihenfolge enthält“	(3.2.2) „Spezifikations-operation (3.2.1), die durch Normen, Richtlinien usw. erfordert wird, wenn die GPS-Grundspezifikation (3.5.4) ohne Modifizierer in der tatsächlichen GPS-Spezifikation (3.5.6) genutzt wird“



<b>Besondere(r) Spezifikations-</b>	(3.3.7) „Spezifikations-operator (3.3.3), der eine oder mehrere besondere Spezifikationsoperationen (3.2.3) enthält“	(3.2.3) „Spezifikations-operation (3.2.1), die nur benötigt wird, wenn die ISO-Grundspezifikation (3.5.4) mit Modifizierern genutzt wird und daher die Default-Spezifikations-operation (3.2.2) ersetzen“
<b>Tatsächliche(r) Spezifikations-</b>	(3.3.8) „Spezifikations-operator (3.3.3), der eine oder mehrere besondere Spezifikationsoperationen in der Technischen Produktdokumentation enthält“	(3.2.4) „spezifische Spezifikationsoperation (3.2.1), explizit oder implizit in der vorliegenden technischen Produktdokumentation angegeben“

Die hier aufgelisteten Definitionen sind die Grundlage für das Verständnis der Mehrdeutigkeiten von Spezifikationen. Entsprechend des Dualitätsprinzips ist für den messtechnischen Nachweis der GPS-Spezifikation der Verifikationsoperator definiert.

#### 4.2.3 Verifikationsoperator

Die Bewertung der bei der Herstellung tatsächlich entstandenen Geometrie des Bauteils erfolgt mit einem messtechnischen Nachweis, der mit dem Verifikationsoperator definiert wird. Aktuelle Normen verwenden für den Begriff Verifikation alternativ Prüfung. Ziel der Verifikation ist die Festlegung von Operationen in gleicher Weise wie für die Spezifikation. Erfüllt der Verifikationsoperator den Spezifikationsoperator ideal und vollständig, dann entstehen keine Abweichungen. Ein vereinfachter Verifikationsoperator führt zu Unsicherheiten (siehe Kapitel 4.7). Tabelle 4 enthält die Definitionen des Normenentwurfs DIN EN ISO 17450 Teil 2 [17450-2(D)] zu den Verifikationsoperatoren und -operationen.

*Tabelle 4: Übersicht der Definitionen der Verifikationsoperatoren (Prüfungsoperatoren) und –operationen mit Verweis auf die Normenkapitel [17450-2(D)]*

	<b>-operator</b>	<b>-operation</b>
<b>Verifikations- /Prüfungs-</b>	(3.3.9) „geordneter Satz von Prüfungsoperationen (3.2.5)“	(3.2.5) „in eine Messung und/oder eine Messausstattung implementierte Operation der entsprechenden tatsächlichen Spezifikationsoperation (3.2.4)“
<b>Ideale(r) Verifikations- /Prüfungs-</b>	(3.3.10) „Prüfungsoperator (3.3.9), basierend auf einem vollständigen Satz idealer Prüfungsoperationen (3.2.6) ausgeführt in einer vorgegebenen Reihenfolge“	(3.2.6) „Prüfungsoperation (3.2.5) ohne bewusste Abweichungen von der entsprechenden tatsächlichen Spezifikationsoperation (3.2.4)“
<b>Vereinfachte(r) Verifikations-/Prüfungs-</b>	(3.3.11) „Prüfungsoperator (3.3.9), der einen oder mehrere vereinfachte Prüfungsoperationen (3.2.7) und/oder Abweichungen von der vorgeschriebenen Reihenfolge der Operationen enthält	(3.2.7) „Prüfungsoperation (3.2.5) mit bewussten Abweichungen von der entsprechenden tatsächlichen Spezifikationsoperation (3.2.4)“
<b>Tatsächliche(r) Verifikations-/Prüfungs-</b>	(3.3.12) „geordneter Satz von tatsächlichen Prüfungsoperationen (3.2.8)“	(3.2.8) „in einem tatsächlichen Messprozess genutzte Prüfungsoperation (3.2.5)“

Zur Beschreibung der Spezifikation und Verifikation mit Operationen werden die aus den verschiedenen Modellen abgeleiteten Definitionen der Geometrieelemente benötigt.

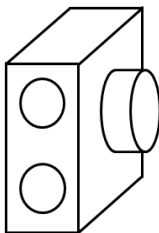
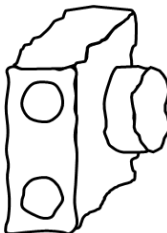
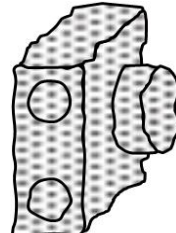
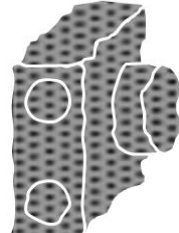

### 4.3 Definitionen von Geometrieelementen

#### 4.3.1 Arten von Geometrieelementen

Geometrieelemente (Geometrische Elemente) sind in der DIN EN ISO 17450 Teil 1 [17450-1] und der DIN EN ISO 22432 [22432] definiert als „*ein Punkt, eine Linie, eine Fläche, ein Volumen oder eine Menge dieser Elemente*“. Nachfolgende Ausführungen fassen die Definitionen der Geometrieelemente dieser Normen [17450-1, 22432] zusammen.

Geometrieelemente leiten sich aus verschiedenen Betrachtungsweisen ab. Eine Möglichkeit ist die Ableitung aus den verschiedenen im Kapitel 4.1 beschriebenen Oberflächenmodellen (Gegenüberstellung siehe Tabelle 5). Weitere Definitionen ergeben sich aus den Operationen an Geometrieelementen für den Spezifikations- und Verifikationsoperator.

*Tabelle 5: Geometrieelemente, abgeleitet aus den verschiedenen Oberflächenmodellen*

Bezeichnung	Nennmodell	Nicht-ideales Oberflächenmodell	Diskretes Oberflächenmodell	Abgetastetes Oberflächenmodell	Reale Oberfläche eines Bauteils
Bildliche Darstellung					
Geometrieelemente	Nenngeometrieelement	Spezifikationsgeometrieelement			
		Verifikationsgeometrieelement			

Das Nenngeometrieelement (Nennmodell) wird vom Konstrukteur als ideales Geometrieelement dargestellt. Aus der Zerlegung der Oberflächenmodelle entstehen

Geometrieelemente, die die funktionalen Eigenschaften abbilden und die unterschiedlichen physikalischen Teile eines Werkstückes darstellen. Sie werden als integrale Geometrieelemente bezeichnet und können z. B. aus der Zerlegung eines Oberflächenmodells, eines anderen integralen Geometrieelementes oder durch die Verknüpfung integraler Geometrieelemente gebildet werden [22432, 17450-1].

Der Spezifikationsoperator definiert die Spezifikationsgeometrieelemente, die vom nicht-idealen oder diskreten Oberflächenmodell abgeleitet sind. Der Verifikationsoperator legt, abgeleitet aus dem nicht-idealen und dem diskreten Oberflächenmodell, die Verifikationsoperationen fest, die am abgetasteten Oberflächenmodell und der realen Oberfläche ausgeführt werden [22432].

#### 4.3.2 Ideales Geometrieelement

Das ideale Geometrieelement ist durch einen Typ und intrinsische Merkmale festgelegt. Mit dem Typ wird die parametrisierte Gleichung definiert und eine Menge von Gestalten (s. u.) benannt. Alle idealen Geometrieelemente gehören zu einer Invarianzklasse. Sieben Klassen werden in der DIN EN ISO 17450 Teil 1 [17450-1] bezüglich der uneingeschränkten Freiheitsgrade, hier als Invarianzgrade bezeichnet, unterschieden. Es existieren sechs Invarianzgrade: drei translatorische, in Richtung der Koordinatenachsen und drei rotatorische, als Drehung um die drei Achsen (Bild 20).

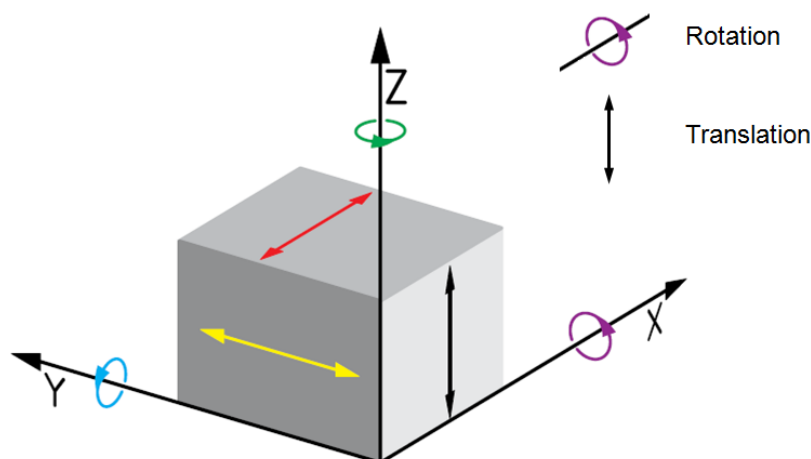
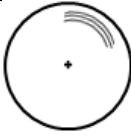
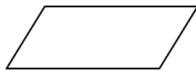
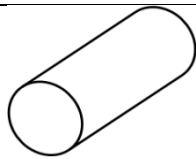
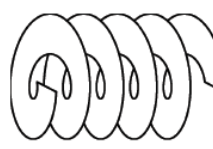
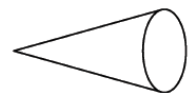
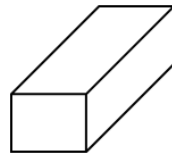



Bild 20: Sechs Invarianzgrade eines Bauteils [Nie12]

*Tabelle 6: Invarianzklassen, Typen und Situationselemente idealer Geometrieelemente [17450-1]*

Invarianz- klasse	Typ	Uneingeschränkte Invarianzgrade	Bildliche Darstellung	Situations- element
Sphärisch	Punkt, Kugel	3 Rotationen um einen Punkt		Punkt
Eben	Ebene	1 Rotation senkrecht zur Ebene und 2 Translationen entlang zweier Geraden in dieser Ebene		Ebene
Zylindrisch	Gerade, Zylinder	1 Translation und 1 Rotation um eine Gerade		Gerade
Schrauben- förmig	Schrauben- linie, Schrauben- fläche	Kombination aus 1 Translation entlang und 1 Rotation um eine einzelne Gerade		Schrauben- -linie
Rotations- symmetrisch	Kreis, Kegel Torus	1 Rotation um eine Gerade		Gerade Punkt
Prismatisch	Prisma	1 Translation entlang einer Geraden in einer Ebene		Ebene Gerade
Komplex	Bezier-Fläche, die auf einer unstrukturierte n Punktwolke im Raum beruht	keine		Ebene Gerade Punkt

Die Invarianzklasse definiert die Gruppe von idealen Geometrieelementen, die „durch dieselbe(n) Verschiebung(en) des idealen Geometrieelements festgelegt sind, für welches das Geometrieelement identisch im Raum gehalten wird“ [17450-1]. Die Invarianzklassen, der Typ, die Invarianzgrade, die zugehörigen Situationselemente (siehe Tabelle 8) und eine bildliche Darstellung idealer Geometrieelemente enthält Tabelle 6.

Die Eigenschaften eines idealen Geometrieelementes sind als intrinsische Eigenschaften eines idealen Elementes definiert. Vier Stufen von Eigenschaften können festgelegt werden:

- (1) Gestalt
- (2) Maßparameter
- (3) Situationselement
- (4) Skelettelement

#### Gestalt

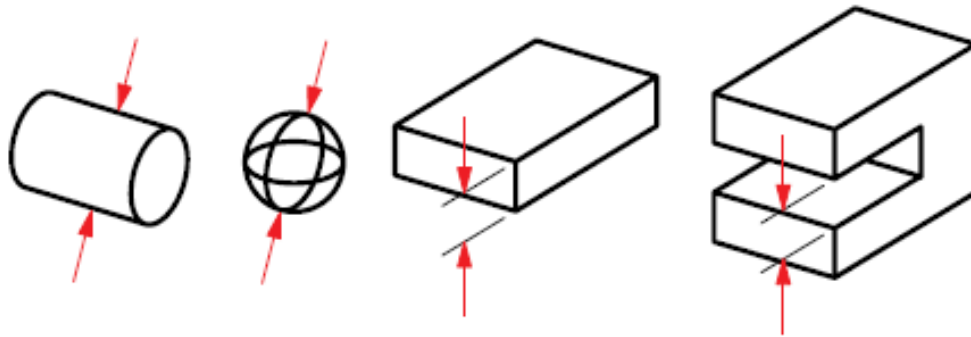
Die Gestalt kennzeichnet den Typ und legt die ideale Geometrie eines Geometrieelementes durch eine mathematisch generierte Beschreibung fest. Es wird unterschieden in ebene, zylindrische, sphärische und konische Gestalt. Eine ideale Fläche kann als Ebene oder ebene Fläche bezeichnet werden.

#### Maßparameter

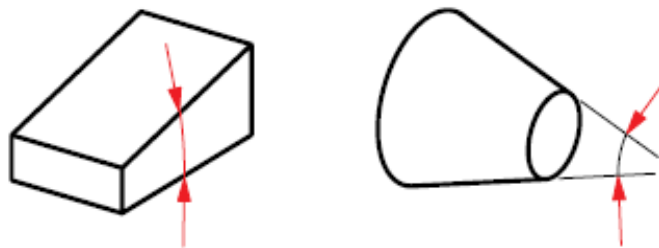
Der Maßparameter ist als lineares Maß oder Winkelmaß eines idealen Geometrieelementes definiert. Ist das Geometrieelement ein Größenmaßelement, dann ist der Maßparameter das Größenmaß.

Der Begriff Größenmaßelement ist identisch mit den Begriffen einfaches Werkstück oder einzelnes Geometrieelement und Maßelement. In der DIN EN ISO 14405 Teil 1 [14405-1] wird Größenmaßelement als „*geometrische Form, definiert durch eine Längen- oder Winkelmaßangabe, die ein Maß ist*“, beschrieben. In den verschiedenen Normen [17450-1, 22432, 14405-1] werden als Größenmaßelemente ein Zylinder, eine Kugel, zwei parallele, sich gegenüberliegende Flächen (Ebenen), ein Torus, ein Kegel, eine

Kugel oder ein Keil bezeichnet. Die DIN EN ISO 17450 Teil 1 [17450-1] und die DIN EN ISO 22432 [22432] unterscheiden lineare Größenmaßelemente und Winkelgrößenmaßelemente. Bild 21 zeigt Beispiele für lineare Größenmaße an Größenmaßelementen und Bild 22 Beispiele für Winkel- oder Kegelmaße.



*Bild 21: Beispiele für das Größenmaß für lineare Größenmaßelemente [Nie12]*



*Bild 22: Größenmaß für Winkel- und Kegelelemente [Nie12]*

Das lineare Größenmaßelement wird in diesen Normen als geometrisches Element mit ein oder mehreren intrinsischen Merkmalen beschrieben. Dabei darf nur eines dieser intrinsischen Merkmale als veränderlicher Parameter betrachtet werden. Dieser veränderliche Parameter muss zusätzlich Mitglied einer sogenannten einparametrischen Familie sein. Erläutert ist dieser Begriff in der Norm DIN EN ISO 22432 [22432] an einer Menge von O-Ringen, deren Größenmaßelement ein Torus ist.

Intrinsische Merkmale sind geometrische Merkmale auf einem idealen Geometrieelement, z. B. ein einzelnes Geometrieelement oder ein Geometrieelement

aus einer Sammlung von mehreren Geometrieelementen. Beispiele für intrinsische Merkmale sind in Tabelle 7 gezeigt.

Tabelle 7: Beispiele intrinsischer Merkmale [25378]

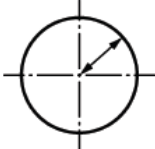
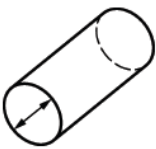
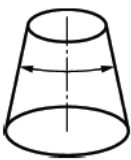
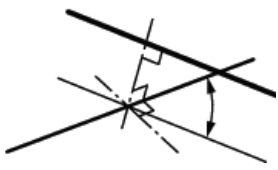
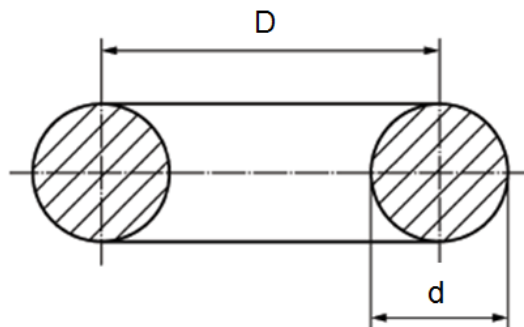
			
Radius eines Kreises	Durchmesser eines Zylinders	Öffnungswinkel eines Kegels	Winkel einer Sammlung von zwei Geraden

Bild 23 zeigt den Querschnitt eines O-Ringes mit dem Durchmesser  $D$  des zentralen Ringes und dem Durchmesser  $d$  des Querschnittes. Einparametrige Familie bedeutet in diesem Fall, dass nur der Durchmesser des Querschnittes verändert wird, wobei der Durchmesser des zentralen Ringes unverändert bleibt.



$D$  Durchmesser des zentralen Ringes  
 $d$  Durchmesser des Querschnittes

Bild 23: O-Ring zur Veranschaulichung des Begriffs „einparametrige Familie“ [22432]

Als weitere Bedingung für ein Größenmaßelement ist festgelegt, dass die Eigenschaft des monotonen Enthaltenseins eingehalten werden muss. Dabei enthält ein Mitglied einer einparametrigen Familie jedes beliebige Mitglied mit einem kleineren Größenmaß. Für den O-Ring bedeutet das, dass der Durchmesser des zentralen Ringes nicht geändert wird und der Querschnittsdurchmesser variiert. Variiert hingegen der



Durchmesser des zentralen Ringes, dann ist die Eigenschaft des monotonen Enthaltenseins nicht erfüllt.

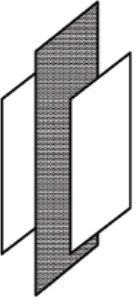
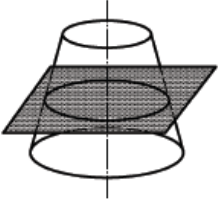
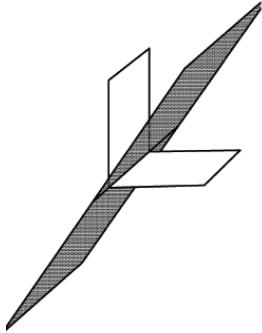
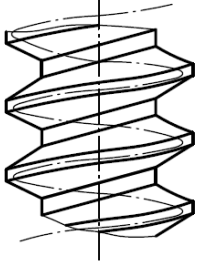
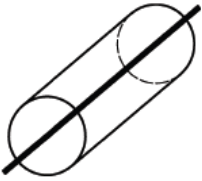

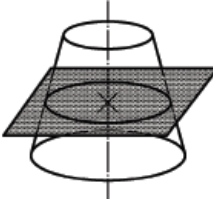
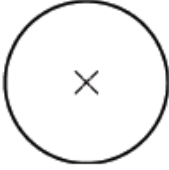
Beispiele für ein Winkelgrößenmaßelement sind Kegel und Keil. Die Definition der Winkelgrößenelemente bezieht sich auf die Invarianzklassen. Winkelgrößenmaßelemente können sein:

- geometrisches Element der rotationssymmetrischen Invarianzklasse, dessen Mantellinie mit einem anderen Winkel als  $0^\circ$  oder  $90^\circ$  im nominellen Zustand geneigt ist, oder
- der Winkel zwischen den Situationselementen von zwei Flächen derselben Gestalt.

#### Situationselement

Das Situationselement ist ein geometrisches Merkmal (Punkt, Linie, Ebene oder Schraubenlinie) eines idealen Geometrieelementes (siehe Tabelle 8), von dem ausgehend die Lage und Richtung des idealen Geometrieelementes festgelegt wird. Den Situationselementen sind keine Maßparameter zugeordnet.

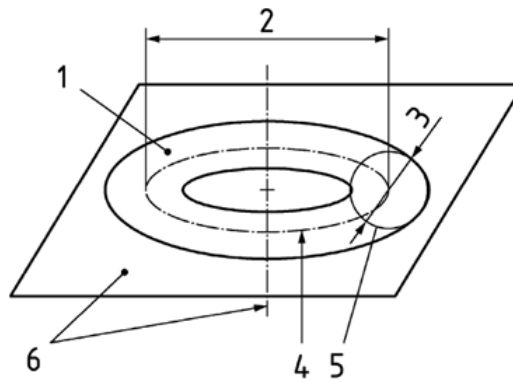
Tabelle 8: Situationselemente [17450-1, 22432]

			
Ebene Situationselemente			Schraubenlinienförmig
Paar paralleler Ebenen	Kegel	Zwei nicht parallele Ebenen	Schraubenlinie
			
Linienförmige Situationselemente		Punktförmige Situationselemente	
Achse eines Zylinders	Achse eines Kegels	Punkt eines Kegels	Punkt einer Kugel

Die Situationselemente werden durch Ableitung (siehe Kapitel 4.3.4) gebildet.

### Skelettelement

Aus der Reduzierung eines Größenmaßelementes ergibt sich das Skelettelement, wenn sein Größenmaß auf Null gesetzt wird. Das Skelettelement ist, z. B. beim Zylinder, identisch mit dem Situationselement. Der Zusammenhang der Eigenschaften idealer Geometrieelemente für einen Torus ist im Bild 24 dargestellt. Hier ist das Skelettelement nicht identisch mit dem Situationselement.



- 1 Integrale nominale Fläche
- 2 Maßparameter des Torus (nicht Größenmaß)
- 3 Größenmaß des Torus
- 4 Skelettelement
- 5 Mantellinie des Torus
- 6 Situationselemente (Gerade und senkrechte Ebene, oder Gerade und ein bestimmter Punkt der Geraden: dieser Punkt entspricht dem Schnitt einer Ebene mit einer Linie)

*Bild 24: Eigenschaften idealer Geometrieelemente am Beispiel eines Torus [17450-1, 22432]*

Ideale Geometrieelemente sind standardmäßig unendlich, wenn sie zur Definition des Nennmodells benutzt werden. Ideale Geometrieelemente entstehen auch als Ergebnis der Operation Assoziation (Kapitel 4.4.5) am nicht-idealen Oberflächenmodell oder der wirklichen Oberfläche und sind dann ebenfalls unendlich. Ausgenommen sind Kugel und Torus. Mit dem Hinweis „*beschränktes ideales Geometrieelement*“ kann diese standardmäßige Festlegung aufgehoben werden. Nicht-ideale Eigenschaften sind dem nicht-idealen Geometrieelement zugeordnet.

#### 4.3.3 Nicht-ideales Geometrieelement

Unvollkommene Eigenschaften eines Geometrieelementes werden mit dem nicht-idealen Geometrieelement dargestellt. Nicht-ideale Geometrieelemente werden unterschieden in:

- das gesamte nicht-ideale Oberflächenmodell,
- ein Teil des nicht-idealen Oberflächenmodells,
- abgeleitete Geometrieelemente von realen Oberflächen oder
- die Schnittmenge zwischen einem nicht-idealen und idealen Geometrieelement.

Nicht-ideale Geometrieelemente sind standardmäßig endlich.

#### 4.3.4 Abgeleitete Geometrieelement

Zentrale Geometrieelemente, auch als Achsen oder Mittelebenen bezeichnet, sind ein Typ abgeleiteter Geometrieelemente, die als nicht integral und auf der wirklichen Oberfläche vorhanden definiert sind. Abgeleitete Geometrieelemente werden durch integrale oder gefilterte Geometrieelemente festgelegt und entstehen durch Anwendung von Operationen. In der DIN EN ISO 22432 [22432] werden zusätzlich zur Definition der DIN EN ISO 17450 Teil 1 [17450-1] versetzte, deckungsgleiche und gespiegelte Geometrieelemente als abgeleitete Geometrieelemente definiert. Aus idealen integralen Geometrieelementen entstehen ideale abgeleitete Geometrieelemente. Das gleiche gilt für nicht-ideale integrale und deren abgeleitete Geometrieelemente. Zentrale Geometrieelemente werden unterschieden in zentraler Punkt (Mittelpunkt), zentrale Linie (Achse) und zentrale Fläche (Mittelebene).

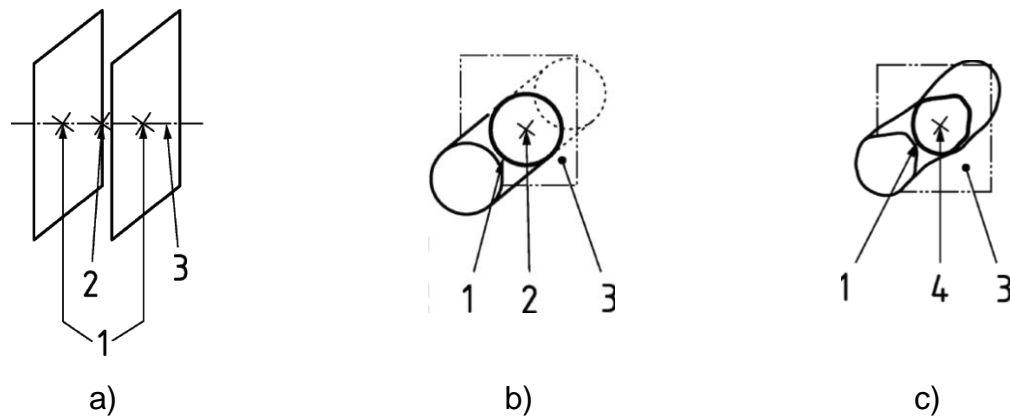
#### Zentrale Geometrieelemente

Der zentrale Punkt ist der berechnete Mittelpunkt eines Punktpaares oder einer unendlichen Anzahl von Punkten

- der nominalen integralen Fläche(n) oder Linie(n) für den nominalen zentralen Punkt und
- der Ersatzfläche(n) oder Ersatzlinie(n) für den direkt zugeordneten zentralen Punkt.

Der berechnete zentrale Punkt ist der berechnete Mittelpunkt einer unendlichen Anzahl von Punkten der nicht-idealen oder gefilterten Fläche(n) oder Linie(n) oder Punktpaare. Punktpaare entstehen durch die Partition (siehe Kapitel 4.4.2) eines Geometrieelementes an einer Schnittlinie (vgl. ermöglichendes Geometrieelement im

Kapitel 4.3.5). Bild 25 zeigt der Norm DIN EN ISO 22432 [22432] entnommene Beispiele für zentrale Punkte.



1 integrales oder gefiltertes Geometrieelement

2 nominaler zentraler Punkt

3 Schnittlinie oder Schnittfläche

4 berechneter zentraler Punkt

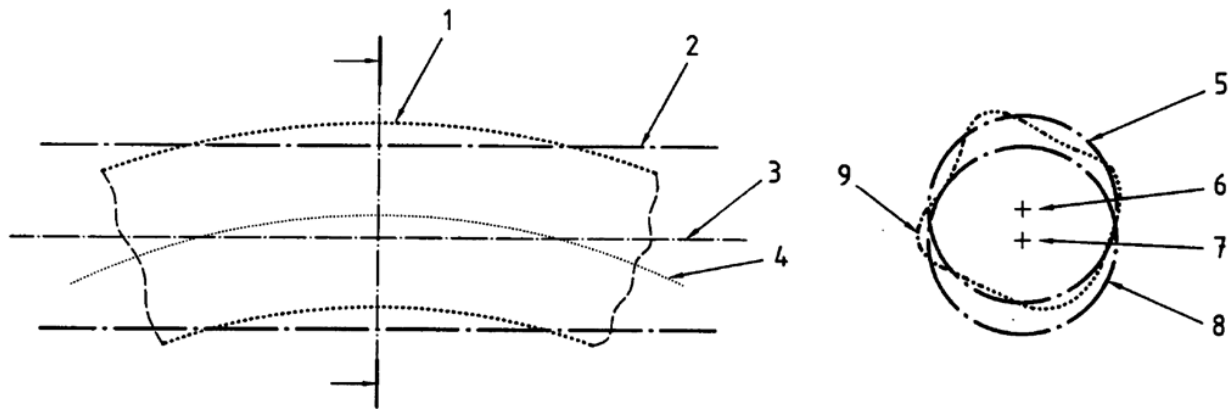
*Bild 25: Beispiele für zentrale Punkte: a) Mittelpunkt zweier Punkte, b) nominaler Mittelpunkt eines Kreises, c) berechneter Mittelpunkt eines Kreises [22432]*

Vier Typen von zentralen Linien sind aktuell definiert [22432]. Aus einer Menge einer unendlichen Anzahl von Schnittpunkten oder von Mittelpunkten der Punktpaare

- der nominalen integralen Fläche(n) oder Linie(n) besteht die nominale zentrale Linie und
- der nicht-idealen integralen oder gefilterten Fläche(n) besteht die nicht-ideale zentrale Linie.

Das aus der nicht-idealen zentralen Linie gebildete Ersatzgeometrieelement bildet die indirekt zugeordnete zentrale Linie. Die direkt zugeordnete zentrale Linie wird aus dem Situations- oder Teilgeometrieelement des Ersatzgeometrieelementes der integralen oder gefilterten Fläche(n) oder Linie(n) abgeleitet.

In der DIN EN ISO 14660 Teil 2 [14660-2] sind die Defaultfestlegungen für die Bestimmung der mittleren Linie eines Zylinders und eines Kegels aus einem extrahierten Geometrieelement definiert.



- |   |   |
|---|---|
| 1 extrahierte Fläche                      | 2 assoziierter Zylinder                   |
| 3 assoziierte zentrale Linie des Zylinder |   |
| 4 extrahierte zentrale Linie              | 5 assoziierter Kreis                      |
| 6 assoziierter zentraler Punkt            | 7 assoziierte zentrale Linie des Zylinder |
| 8 assoziierter Zylinder                   | 9 extrahierte Linie                       |

*Bild 26: Extrahierte zentrale Linie eines Zylinders [14660-2]*

Die Bestimmung der extrahierten zentralen Linie eines Zylinders ist im Bild 26 verdeutlicht. Sie ist in [14660-2] definiert als der geometrische Ort von zentralen Punkten der Querschnitte, die aus den assoziierten Kreisen abgeleitet sind und rechtwinklig zur zentralen Linie des assoziierten Zylinders stehen. Die assoziierten Kreise und Zylinder werden als Default mit dem Assoziationskriterium nach Gauß bestimmt. Die Assoziationskriterien sind im Kapitel 4.4 Operationen an Geometrieelementen weiterführend beschrieben.

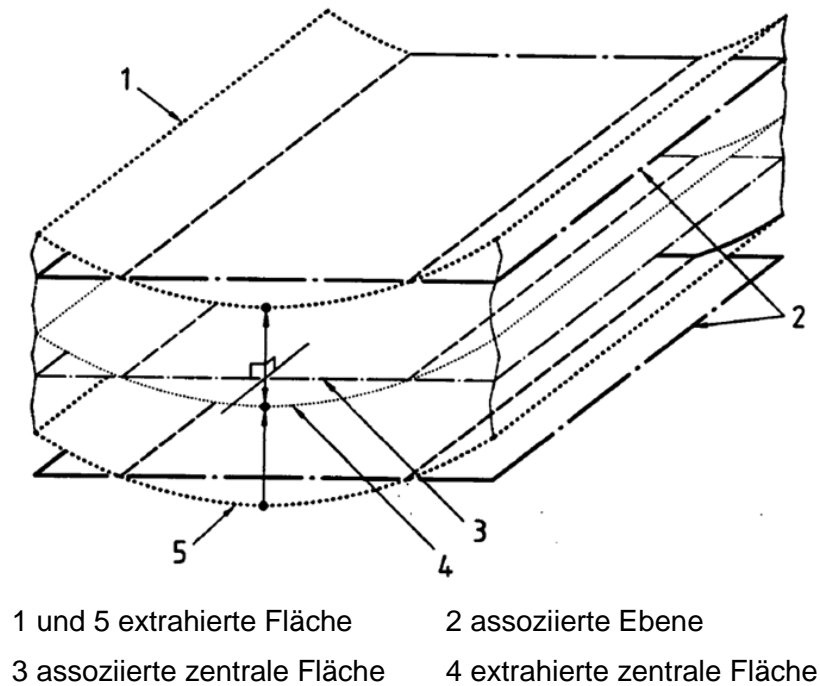
Die zentrale Fläche besteht aus der Menge einer unendlichen Anzahl von Mittelpunkten der Punktpaare

- der nominalen integralen Fläche(n) für die nominale zentrale Fläche,
- der nicht-idealen integralen oder gefilterten Fläche(n) für die nicht-ideale zentrale Fläche und
- der Ersatzfläche(n) für die direkt zugeordnete zentrale Fläche [22432].

Die indirekt zugeordnete zentrale Fläche entspricht dem Ersatzgeometrieelement einer nicht-idealen zentralen Fläche. Es beschreibt ein eindeutiges ideales

Geometrieelement, welches einem nicht-idealen Geometrieelement assoziiert ist. Die Bildung der Ersatzgeometrieelemente erfolgt mit der Operation Assoziation (siehe Kapitel 4.4.5).

Die Defaultfestlegung für die Ermittlung der zentralen Fläche zweier paralleler Ebenen (Bild 27) ist ebenfalls in der DIN EN ISO 14660-2 [14660-2] festgelegt.

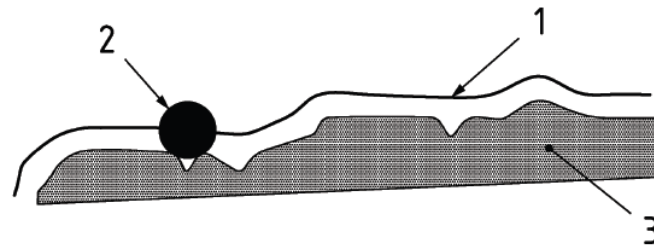


*Bild 27: Extrahierte zentrale Fläche [14660-2]*

Die zentrale Fläche ist definiert als geometrischer Ort, der aus zentralen Punkten von zwei extrahierten parallelen Flächen abgeleitet wird. Die Verbindungslinie der Punktpaare steht senkrecht auf der assoziierten zentralen Ebene, die der zentralen Ebene der extrahierten gegenüberliegenden parallelen Ebenen entspricht [14660-2].

### Versetzte Geometrieelemente

Versetzte Geometrieelemente definieren z. B. die Mittelpunktsbahn eines Antastelementes. Es wird zwischen versetzten Linien und Flächen in Abhängigkeit der Art des extrahierten Geometrieelementes unterschieden. Beispielhaft ist eine versetzte Linie im Bild 28 für ein berührendes Geometrieelement Kreisscheibe gezeigt.



1 versetztes Geometrieelement

2 berührendes Geometrieelement (Kreisscheibe)

3 wirkliches integrales Geometrieelement

*Bild 28: Versetzte Linie [22432]*

#### Deckungsgleiche Geometrieelemente

Deckungsgleiche Geometrieelemente entstehen durch Drehung oder Verschiebung des Geometrieelementes. Die Drehung erfolgt um einen bestimmten Winkel und um eine festgelegte Achse. Die Verschiebung erfolgt um einen bestimmten Betrag entlang einer vorgegebenen Richtung. Punkte, Linien und Flächen können gedreht und verschoben werden.

#### Gespiegelte Geometrieelemente

Bei der Spiegelung werden Punkte, Linien oder Flächen an einer festgelegten Ebene gespiegelt, um Geometrieelemente zu erzeugen. Die verschiedenen Arten der abgeleiteten Geometrieelemente sind in der Tabelle 9 an nominalen Geometrieelementen zusammengefasst.



Tabelle 9: Arten nominaler abgeleiteter Geometrieelemente [22432]

Art der Ableitung	Bildliche Darstellung	Bezeichnung der Geometrieelemente
Zentral		1 nominales integrales Geometrieelement 2 nominales zentrales Geometrieelement
Versetzt		1 nominales integrales Geometrieelement 3 nominales versetztes Geometrieelement
Gedreht		1 nominales integrales Geometrieelement 4 nominales gedrehtes Geometrieelement
Vershoven		1 nominales integrales Geometrieelement 5 nominales verschobenes Geometrieelement
Gespiegelt		1 nominales integrales Geometrieelement 2 nominales gespiegeltes Geometrieelement

#### 4.3.5 Ermöglichende Geometrieelemente

Die ermöglichenden Geometrieelemente sind idealgeometrisch und werden genutzt, um andere Geometrieelemente durch eine Operation zu errichten. Die Situationselemente, aufgelistet in der Tabelle 8, gehören neben den Schnittelementen und den berührenden Geometrieelementen zu den ermöglichenden Geometrieelementen. Beispiele für diese sind die zentrale Linie eines Zylinders (Achse), eine Schnittebene, eine Drehachse, die Richtung einer Verschiebung oder eine Spiegelachse. Berührende Geometrieelemente

sind von endlicher Ausdehnung und werden verwendet, um die mögliche Berührung des Werkstücks oder Oberflächenmodells nachzuahmen. Ausführlich sind diese in der DIN EN ISO 22432 [22432] beschrieben.

## **4.4 Operationen an Geometrieelementen**

### **4.4.1 Operationen als Werkzeug**

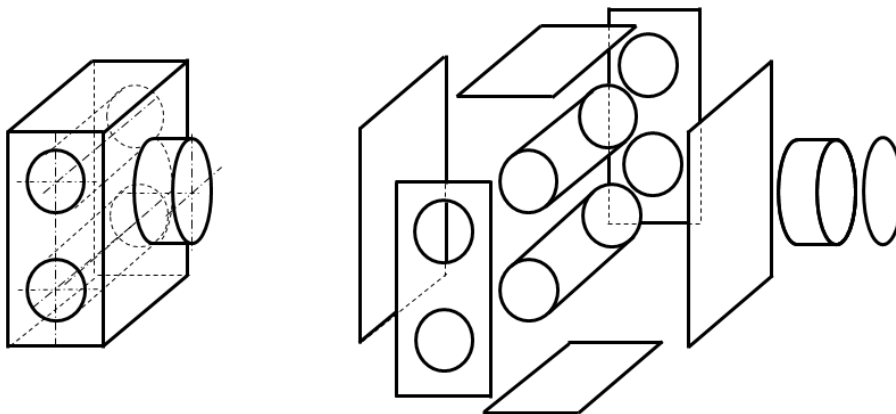
Operationen sind in der Norm DIN EN ISO 17450 Teil 1 [17450-1] als spezielles Werkzeug definiert,

- die Elemente oder
- die Werte eines Merkmals,
- den Nennwert des Merkmals und
- die Grenze/n des Merkmals

zu ermitteln. Eine besondere Operation ist die Elementoperation als ein spezielles Werkzeug, um Geometrieelemente zu erhalten. Die Anwendung der Operationen erzeugt ideale oder nicht-ideale Geometrieelemente.

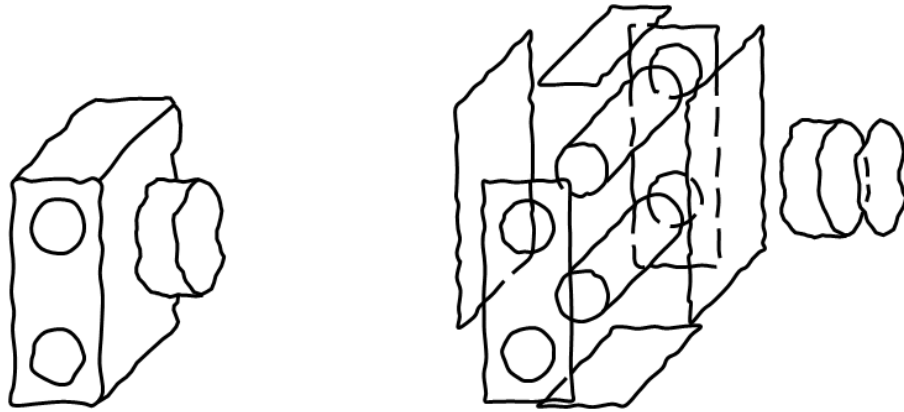
### **4.4.2 Partition**

Die Partition entspricht der Trennung eines Nennmodells, nicht-idealen Oberflächenmodells oder der realen Oberfläche in einzelne Geometrieelemente oder der Identifizierung von eingeschränkten Teilen idealer und nicht-idealer Geometrieelemente. Die Partition des Nennmodells (Bild 29) wird zur Definition der Beziehung der Geometrieelemente für die Spezifikation verwendet.



*Bild 29: Partition des Nennmodells*

Die Partition des nicht-idealen Oberflächenmodells stellt Bild 30 dar. Mit der Einführung des diskreten und abgetasteten Oberflächenmodells kann der Begriff der physikalischen Partition dem abgetasteten Oberflächenmodell zugeordnet werden. Die physikalische Partition erfolgt an der realen Oberfläche des Bauteils.



*Bild 30: Nicht-ideales Oberflächenmodell und Partition des nicht-idealen Oberflächenmodells*

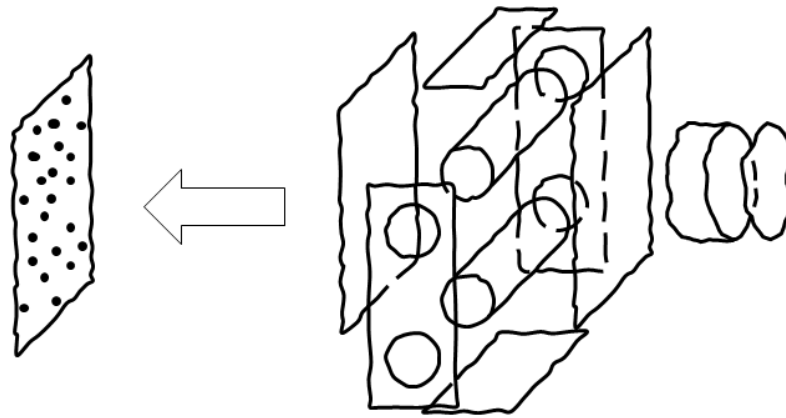
Geometrieelemente, die durch die Partition entstehen, werden als integrale Geometrieelemente bezeichnet und stellen eine intrinsische Eigenschaft der realen Oberfläche oder des Oberflächenmodells dar.

#### 4.4.3 Extraktion

Die Identifizierung einer endlichen Anzahl von Punkten eines nicht-idealen Geometrieelementes ist das Ziel der Operation Extraktion. Dabei sind festgelegte Regeln zu beachten [17450-1]. In der DIN EN ISO 14406 Erfassung [14406] werden die Terminologie und die Konzepte für die Extraktion und Rekonstruktion (siehe Kapitel 4.4.8) im GPS-System aufgezeigt.

Die physikalische Extraktion wird dem abgetasteten Oberflächenmodell zugeordnet und ist damit Bestandteil des Verifikationsoperators. Diese Operation beruht auf der Anwendung physikalischer Verfahren, die auf mechanische, elektromagnetische, optische usw. Art die Punkte identifizieren. Zur Definition des diskreten Oberflächenmodells wird das nicht-ideale Oberflächenmodell mit einer endlichen Anzahl von Punkten virtuell extrahiert (Bild 31), um den Spezifikations- und

Verifikationsoperator darzustellen. Die entstehenden Geometrieelemente werden als extrahierte Geometrieelemente bezeichnet.



*Bild 31: Extraktion von Punkten an einem Geometrieelement des nicht-idealen Oberflächenmodells*

Die bisher festgelegten Kriterien für die physikalische Extraktion geometrischer Eigenschaften werden im Rahmen der Arbeit nicht beschrieben.

#### 4.4.4 Filterung

Bei der Filterung werden aus einem nicht-idealen Geometrieelement die Informationen entfernt, die nicht zur Darstellung der Eigenschaften dieses Geometrieelementes benötigt werden [17450-1, 16610-1]. Damit ist der Informationsgehalt des gefilterten Geometrieelementes geringer gegenüber dem Informationsgehalt des ungefilterten Geometrieelements. Filterung wird auch als Transformation eines Schwankungsgraphen in einen anderen bezeichnet, bei der der Informationsgehalt reduziert wird [17450-1]. Im Bild 32 ist dargestellt, wie aus einem Profil durch Filterung zwei neue Profile, deren Informationsgehalt gegenüber dem Ausgangsprofil reduziert ist, abgeleitet wird. Die Filterung und Filterarten sind in der Normenreihe ISO 16610 ff. [16610 ff] beschrieben.



*Bild 32: Filterung eines Profils [17450-1]*

#### 4.4.5 Assoziation

Die Assoziation ist eine Operation, bei der ein ideales Geometrieelement an ein nicht-ideales Geometrieelement nach vorgegebenen Kriterien angepasst wird, um Abweichungen des nicht-idealen Geometrieelementes zu bewerten oder Stellungsmerkmale [25378] zwischen idealen und nicht-idealen Geometrieelementen zu bestimmen. Es sind verschiedene Assoziationskriterien definiert, die Nebenbedingungen fordern können [17450-1]. Das ideale Geometrieelement wird als assoziiertes Geometrieelement bezeichnet.

Assoziationskriterien werden unterschieden in Gaußelement, Minimum-Zone, Hüll-, Pferch- und Tangentialelement [5459, 17450-1, 12180-1, 12181-1, 12780-1, 12781-1]. Für den Kreis sind die Assoziationskriterien im Bild 33 grafisch zusammengestellt. Das Gaußelement, auch als Ausgleichselement nach Gauß oder mittleres Element bezeichnet, wird gebildet, indem die Summe der Quadrate der Abstände zwischen jedem Punkt des nicht-idealen Geometrieelementes zum idealen Geometrieelement ein Minimum ist.

Die Minimum Zone, auch als Tschebyscheff Ausgleichselement bezeichnet, minimiert den Abstand von zwei Geometrieelementen, die entweder coaxial (z. B. beim Kreis oder Zylinder) oder parallel (z. B. bei der Gerade oder Ebene) sein müssen und an die nicht-idealen Geometrieelemente angelegt werden.

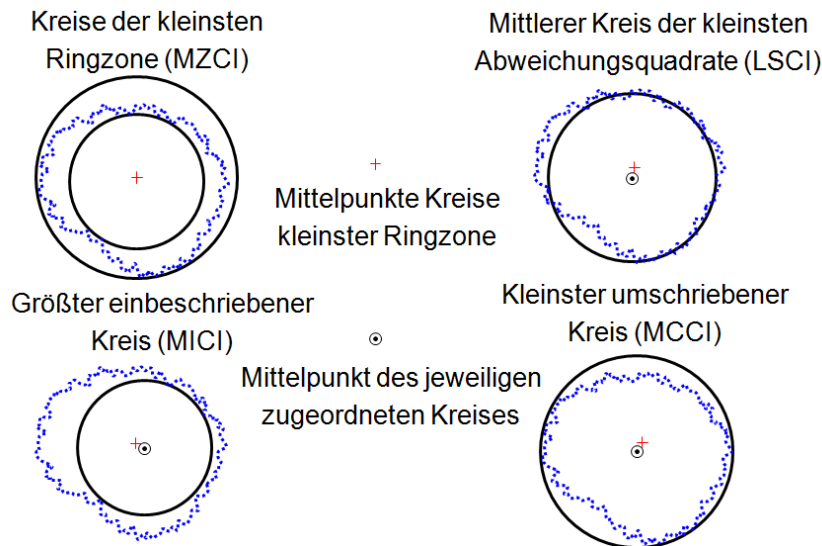


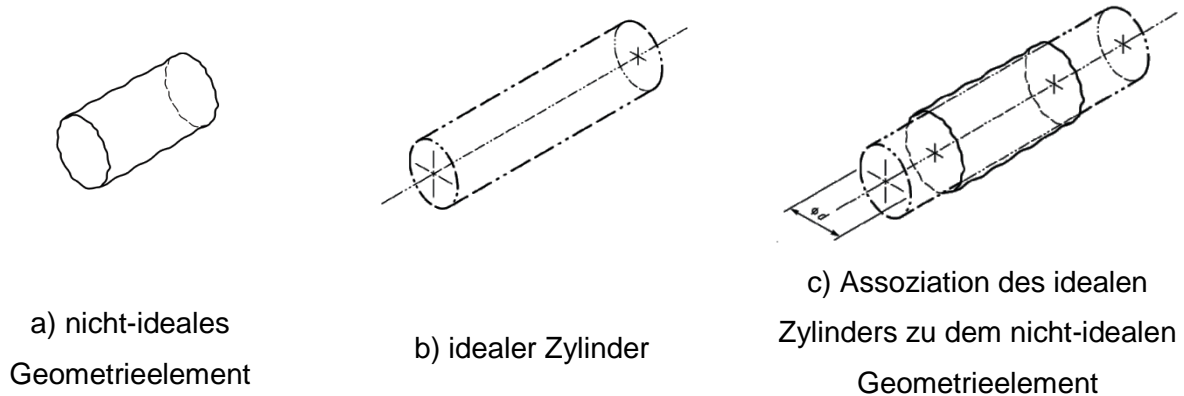
Bild 33: Assoziationskriterien am Kreis [nach 12181-1]

Beim Hüllelement wird das nicht-ideale Geometrieelement vom kleinstmöglichen idealen Geometrieelement umschlossen. Das Pferchelement entspricht der Maximierung des einbeschriebenen idealen Geometrieelementes. Die Arten von Assoziationskriterien und deren Anwendbarkeit für die verschiedenen Geometrieelemente sind in der Tabelle 10 zusammengestellt. Tangentialelemente sind derzeit jedoch noch nicht in den Normen definiert.

Tabelle 10: Geometrieelemente und mögliche Assoziationskriterien [Kef12]

Geometrieelemente	Gauß	Minimumzone	Tangential	Hüll	Pferch
Gerade	X	X	X		
Kreis	X	X		X	X
Ebene	X	X	X		
Kugel	X	X		X	X
Zylinder	X	X		X	X
Kegel	X	X		X	X
Torus	X	X		X	X

Die Assoziation (Bild 34c) eines idealen Zylinders (Bild 34b) an einen nicht-idealen Zylinder (Bild 34a) wird im Bild 34 beispielhaft dargestellt. Als Kriterium ist der Pferchzylinder gewählt, der von innen das nicht-ideale Geometrieelement berührt.

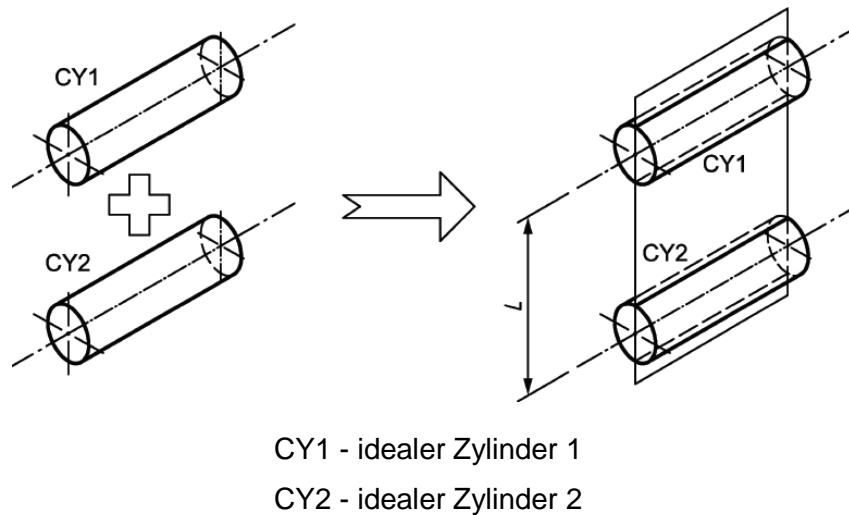


*Bild 34: Beispiel einer Assoziation am Zylinder [17450-1]*

Mit weiteren Operationen ist die gemeinsame Betrachtung von Geometrieelementen möglich.

#### 4.4.6 Kollektion

Bei der Kollektion werden mehrere ideale oder nicht-ideale Geometrieelemente aus funktionaler Sicht gemeinsam betrachtet. Das resultierende Geometrieelement kann sich im Typ und der Invarianzklasse von den ursprünglichen Geometrieelementen unterscheiden [17450-1]. Im Bild 35 werden zwei Zylinder gemeinsam betrachtet. Die Zylinder sind parallel und liegen in einer Ebene. Diese Kollektion ist nur noch invariant gegenüber einer Translation entlang einer Geraden und besitzt damit einen niederen Invarianzgrad als ein einzelner Zylinder. Das Stellungsmerkmal zwischen den beiden Zylindern wird zu einem intrinsischen Merkmal der gemeinsam betrachteten Zylinder [17450-1].

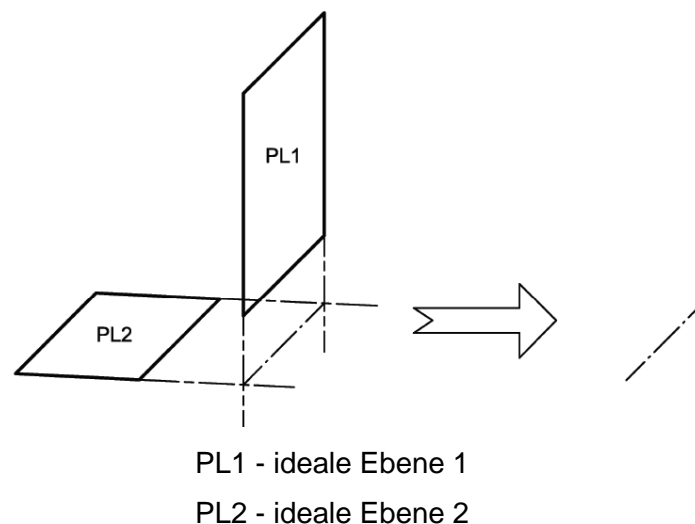


*Bild 35: Sammlung zweier idealer Zylinder [17450-1]*

Für die Ableitung eines neuen Geometrieelementes werden diese aus mehreren Geometrieelementen konstruiert.

#### 4.4.7 Konstruktion

Bei dieser Operation wird ein ideales Geometrieelement aus anderen Geometrieelementen durch eine Konstruktion abgeleitet [17450-1]. Dabei sind Nebenbedingungen einzuhalten, die derzeit nicht weiter beschrieben sind. An der Ableitung einer Schnittgeraden aus zwei Ebenen wird diese Operation im Bild 36 verdeutlicht.



*Bild 36: Konstruktion einer Geraden durch den Schnitt zweier idealer Ebenen [17450-1]*



Mit der Zusammensetzung ist die Bildung eines Bezugssystems (Kapitel 5.3.5) auch an der realen Oberfläche eines Bauteils möglich.

#### *4.4.8 Rekonstruktion*

Die Rekonstruktion von Geometrieelementen wird angewendet, wenn ein nicht-zusammenhängendes Geometrieelement (z. B. ein extrahiertes Geometrieelement) mit einem idealen Geometrieelement z. B. geschnitten werden soll, um einen Zusammenhang zwischen den einzelnen extrahierten Punkten zu erzeugen. Aus einem nicht zusammenhängenden Geometrieelement wird durch die Rekonstruktion ein zusammenhängendes Geometrieelement erzeugt [17450-1].

Mit der Definition von Merkmalen für Geometrieelemente und für Beziehungen zwischen Geometrieelementen wird im GPS-System eine regelbasierte Spezifikationsmethodik angestrebt.

### **4.5 Merkmale von und zwischen Geometrieelementen**

Die Definition der Abweichungen und Abmessungen von Geometrieelementen wird durch GPS-Merkmale ermöglicht. Die Abweichungen werden bezüglich idealer Geometrieelemente definiert und unterschieden in Oberflächenbeschaffenheit, Form, Ort, Richtung und Lauf. Die GPS-Merkmale werden als Grundmerkmale bezeichnet und sind im GPS-System als intrinsische Merkmale oder Stellungsmerkmale definiert. Mit den Grundmerkmalen soll ermöglicht werden, dass alle individuellen geometrischen Merkmale festgelegt werden können.

Diese Betrachtungsweise ist in der DIN EN ISO 25378 [25378] seit Dezember 2011 veröffentlicht. Der aktuelle Stand dieser Norm ist nicht verständlich. In den folgenden Abschnitten wird trotzdem versucht, die grundlegenden Gedanken dieser neuen Betrachtungsweise auszudrücken. Die in der Norm dargestellten Ansätze bieten die Möglichkeit, das GPS-System weiter regelbasiert auszubauen, können aber derzeit nicht klar abgeleitet werden.

Grundlegend wird der Ansatz verfolgt, dass jedes ideale Nennelement ein entsprechenden Invarianzgrad hat (siehe Tabelle 6). Mit der Definition der geometrischen Merkmale können die Invarianzgrade eines Geometrieelementes eingeschränkt und unabhängig voneinander überwacht werden (Tabelle 11).

*Tabelle 11: Möglichkeiten der Einschränkung der freien Parameter eines Geometrie-elementes [nach 25378]*

<b>Freier Parameter eines Geometrieelementes</b>	<b>Unabhängige Überwachung von</b>
Oberflächenbeschaffenheit / Form	1 Parameter der Gestalt
Maß	1 Parameter des Maßes
Winkel	3 Invarianzgraden der Rotation
Translation	3 Invarianzgraden der Translation

Mit der Oberflächenbeschaffenheit, die wie die Form ein Parameter der Gestalt des Geometrieelementes ist, und dem Maß ergeben sich acht Invarianzgrade. Für eine eindeutige Spezifikation müssen die Invarianzgrade eines Geometrieelementes zusätzlich eingeschränkt werden, die nicht bereits durch den Invarianzgrad des Nennelementes kontrolliert werden. Die Einschränkung der Invarianzgrade muss demzufolge einerseits über einen Maßparameter und einen Formparameter, der die Oberflächenbeschaffenheit mit einschließt, erfolgen. Andererseits müssen die Translationen und die Rotationen des Geometrieelementes über die Richtung, den Ort oder Lauf des Geometrieelementes in Bezug zu einem anderen Geometrieelement begrenzt werden. Die aktuellen Möglichkeiten, diese Invarianzgrade einzuschränken enthält das Kapitel 5.

In der Norm wurden die Begriffe Form-, Stellungen-, Orts- und Richtungsmerkmal eingeführt. Zusätzlich wird z. B. unterschieden in abhängige, unabhängige und zonale

Merkmale, Merkmale einer Lehre sowie individuelles, globales, lokales und berechnetes Merkmal.

Diese Ansätze werden aufgrund der unklaren Definitionen nicht weiter in der Arbeit verfolgt, obwohl sie auch unterstützen würden, den Zusammenhang der Modelle, Operationen und Geometrieelemente zu verdeutlichen.

#### 4.6 Zusammenhang zwischen den Modellen, den Operationen an Geometrieelementen und den Geometrieelementen

Über die Beziehung der Definitionen von Geometrieelementen kann der Zusammenhang zwischen den Modellen und den Operationen an Geometrieelementen verdeutlicht werden.

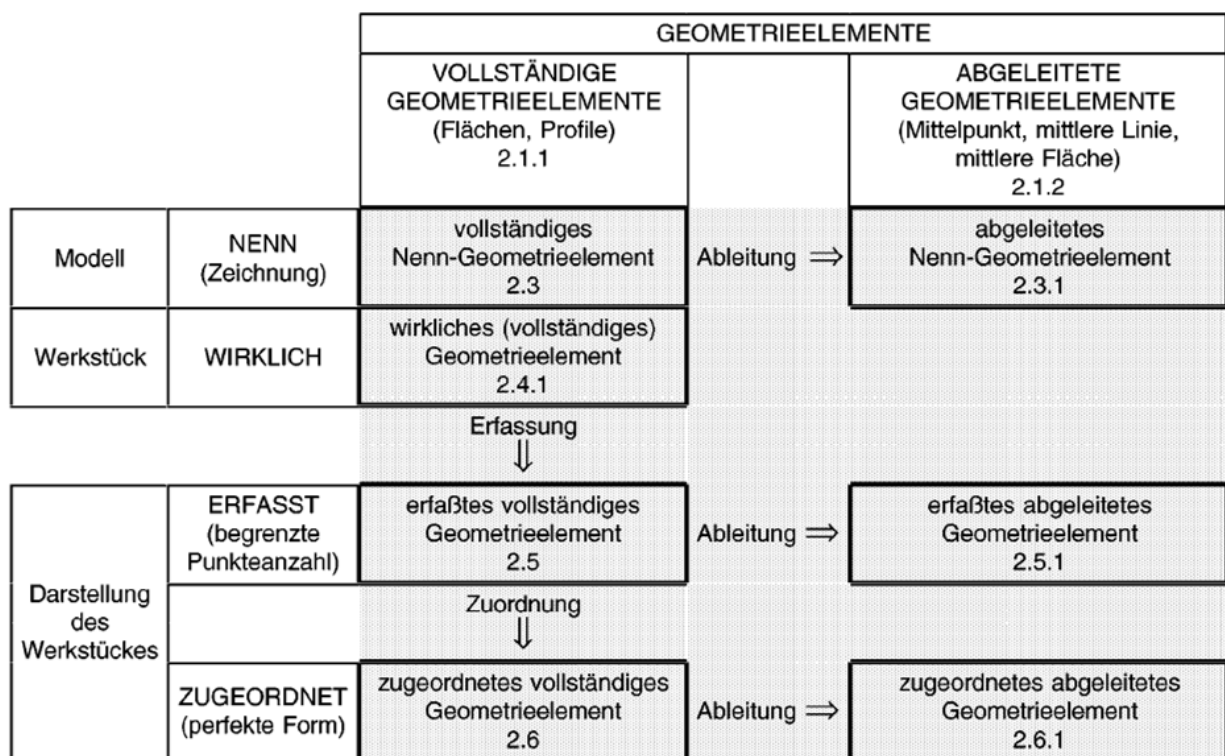
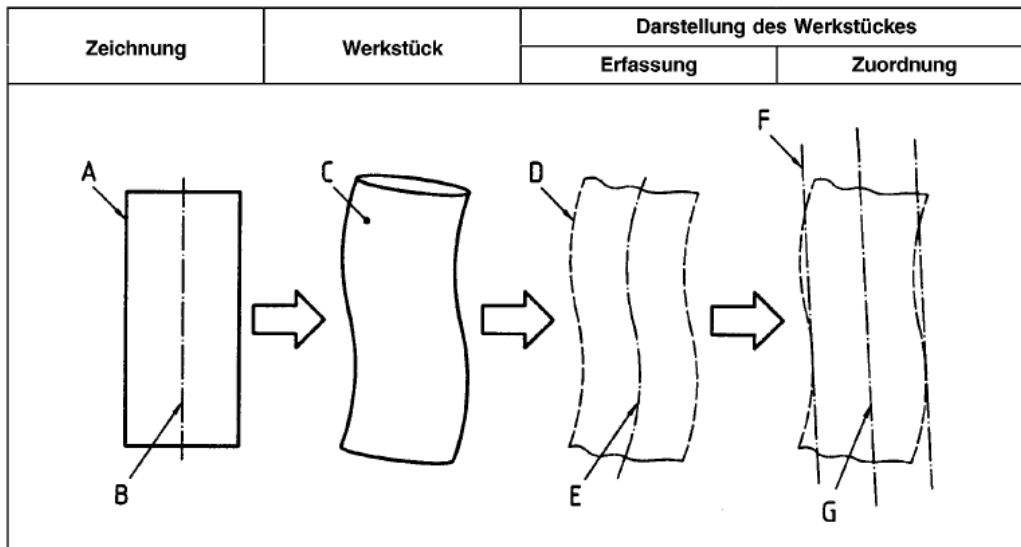


Bild 37: Matrixstruktur der Definition der Geometrieelemente [14660-1]

In der DIN EN ISO 14660 Teil 1 [14660-1] aus dem Jahr 1999 sind vollständige und abgeleitete Geometrieelemente zusammengefasst. Das vollständige Geometrieelement wird in der Norm mit „Linie oder Fläche auf einer Fläche“ definiert und nicht weiter erläutert. In Form einer Matrix sind diese Zusammenhänge im Bild 37 dargestellt. Bild 38

zeigt die Definitionen der Geometrieelemente in Bezug auf die Modelle und die reale Oberfläche.



A vollständiges Nenn-Geometrieelement

B abgeleitetes Nenn-Geometrieelement

C reales Geometrieelement

D extrahiertes vollständiges Geometrieelement

E extrahiertes abgeleitetes Geometrieelement

F assoziiertes vollständiges Geometrieelement

G assoziiertes abgeleitetes Geometrieelement

*Bild 38: Beziehung der Definition der Geometrieelemente [14660-1]*

Den Zusammenhang zwischen den Modellen, Operatoren und Operationen für die Spezifikation zeigt das Bild 39. Neben den Operationen an Geometrieelementen wird zur Festlegung des Spezifikationsoperators die Operation Auswertung eingeführt, um Werte festzulegen.

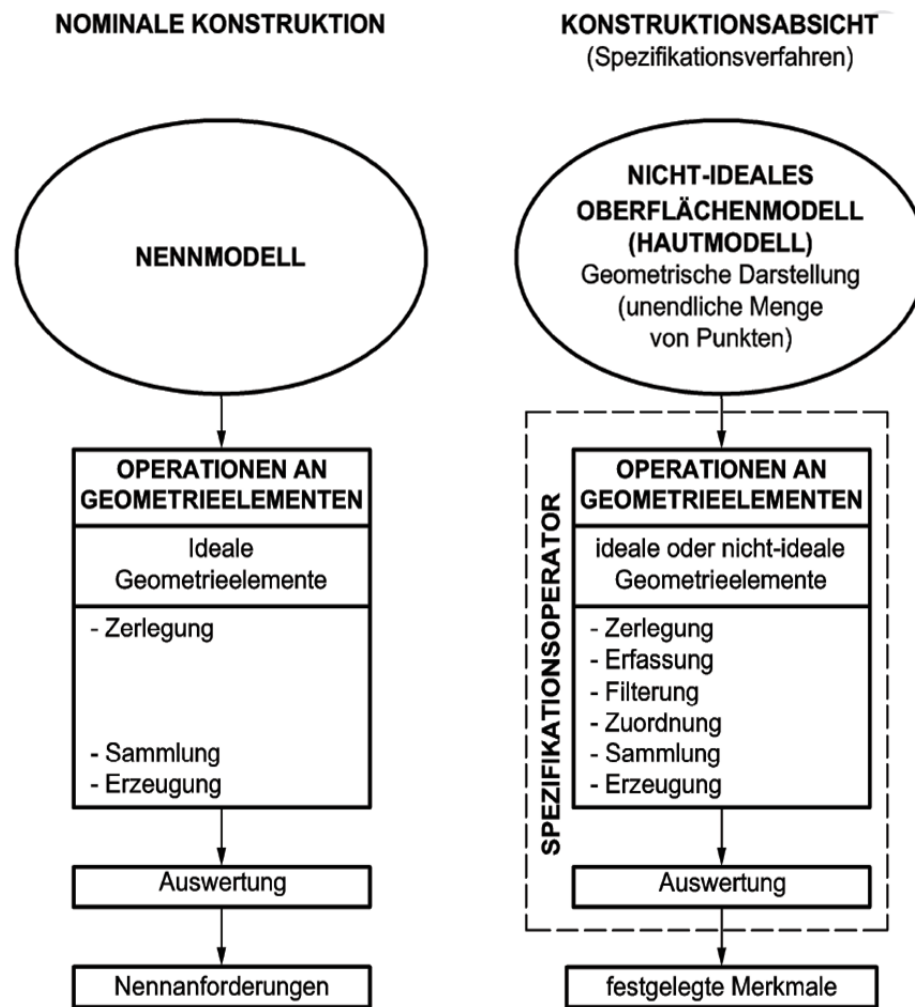


Bild 39: Vergleich zwischen der nominalen Konstruktion und der Konstruktionsabsicht

[17450-1]

Die Spezifikation erfolgt am nicht-idealen Oberflächenmodell mit den nicht-idealen Geometrieelementen. Der Zusammenhang zwischen der geometrischen Spezifikation am nicht-idealen Oberflächenmodell und der messtechnischen Verifikation der realen Oberfläche des Bauteiles ist in Bild 40 aufgezeigt. Spezifikation und Verifikation werden mit den gleichen Operationen definiert. Dem Grundsatz der Dualität (Kapitel 3.3) entsprechend wird der Verifikationsoperator demgemäß festgelegt, dass er den Spezifikationsoperator so widerspiegelt, dass die zulässige Unsicherheit beim Nachweis der geometrischen Eigenschaften nicht überschritten wird. Der Spezifikationsoperator soll unabhängig vom Verifikationsoperator festgelegt werden.

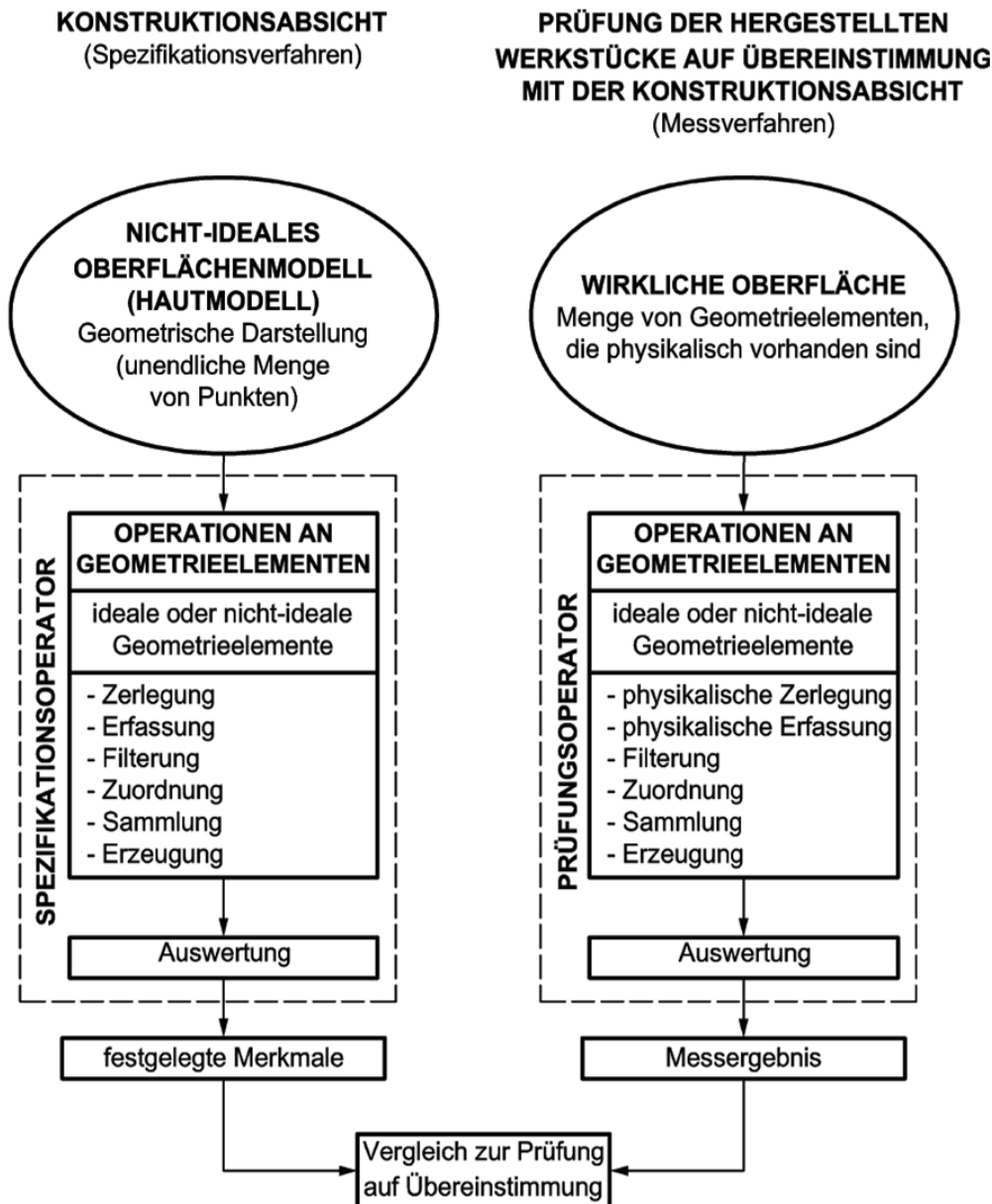


Bild 40: Parallele Spezifikations- und Verifikationsprozeduren [17450-1]

Mehrfach wurde bereits darauf hingewiesen, dass aufgrund unvollständiger oder mehrdeutiger Spezifikations- und Verifikationsoperatoren Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten auftreten.

## 4.7 Unsicherheiten

### 4.7.1 Der Begriff Unsicherheit

Unsicherheiten entstehen, wenn Abweichungen zwischen einer Vorgabe und deren Umsetzung auftreten. Im Rahmen des GPS-Systems werden Unsicherheiten

beschrieben, die nicht nur die Messunsicherheiten im Rahmen der Verifikation darstellen. Unsicherheiten entstehen in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus und werden demzufolge von unterschiedlichen Fachbereichen erzeugt. Im Normenentwurf der DIN EN ISO 17450 Teil 2 [17450-2(D)] wird Unsicherheit als *„einem genannten Wert oder einer Beziehung zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise dem genannten Wert oder der Beziehung zugeordnet werden könnten“*, erklärt. Als genannter Wert wird in dieser Norm ein Messergebnis oder eine Spezifikationsgrenze bezeichnet.

Eine Beziehung ist im Rahmen des GPS-Systems definiert [17450-2(D)] als die Differenz, die sich aus der Anwendung unterschiedlicher Operatoren auf das gleiche Geometrieelement ergibt. Diesem Begriff wird auch die Differenz des Wertes eines Spezifikationsoperators zu einem Wert, der mit der Funktion des Werkstückes korreliert, zugeordnet. Der Ausschnitt (Bild 41) aus Bild 17 fasst die Arten der Unsicherheit zusammen und stellt den Zusammenhang zu den Operationen dar.

In der zukünftigen Norm, die aus diesem Entwurf entsteht, wird die Übereinstimmungsunsicherheit als Mehrdeutigkeit der Funktionsbeschreibung und die Spezifikationsunsicherheit als Mehrdeutigkeit der Spezifikation bezeichnet [17450-2(I)].

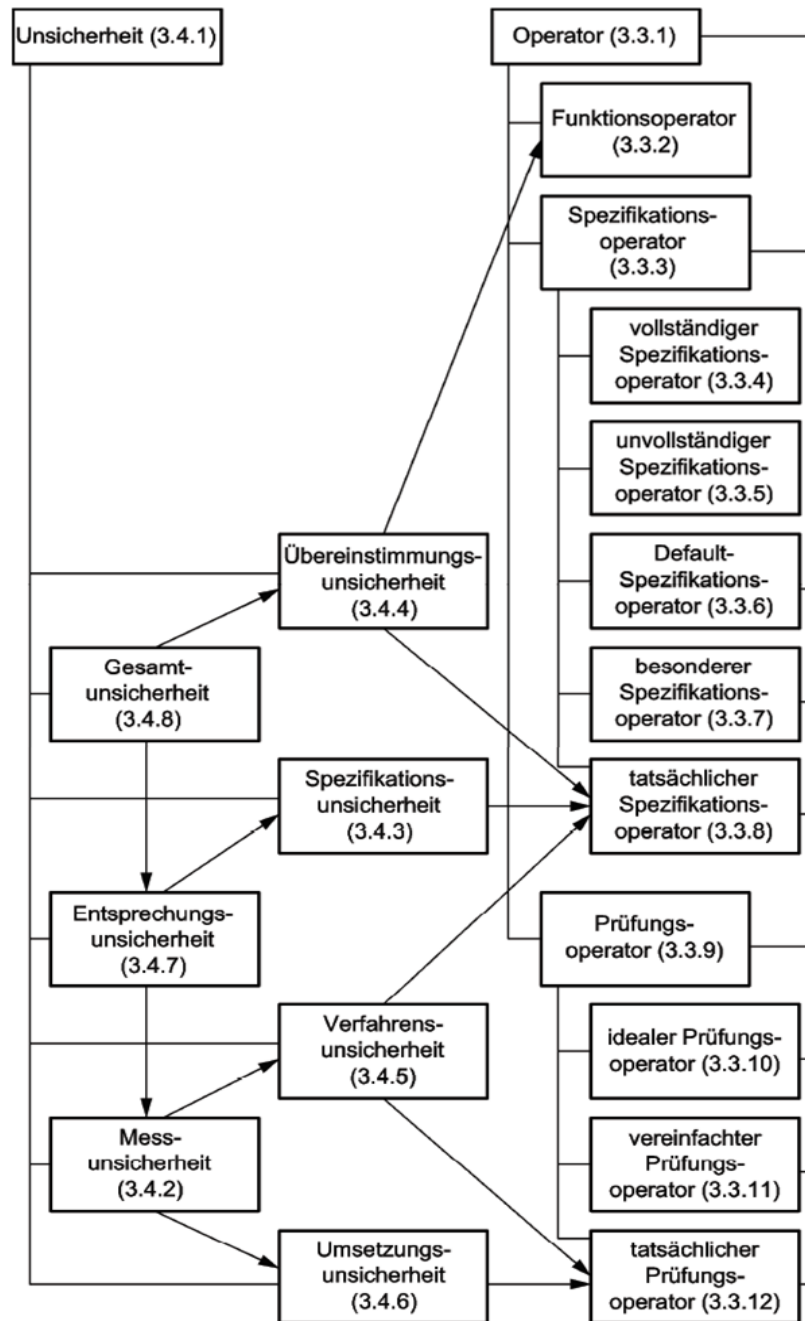


Bild 41: Zusammenhang zwischen Unsicherheiten und Operatoren

(Ausschnitt aus Bild 17) [17450-2(D)]

Die Gesamtunsicherheit setzt sich zusammen aus der Übereinstimmungsunsicherheit, Spezifikationsunsicherheit und Messunsicherheit.



#### 4.7.2 Übereinstimmungsunsicherheit

Die Übereinstimmungsunsicherheit ergibt sich aus der Differenz zwischen dem tatsächlichen Spezifikationsoperator und dem Funktionsoperator. Im Regelfall sind mehrere GPS-Spezifikationen zur Simulation einer Funktion notwendig, die alle bei der Ermittlung der Übereinstimmungsunsicherheit betrachtet werden müssen.

In der Norm [17450-2(D)] wird beispielhaft ein Funktionsoperator beschrieben, der die Fähigkeit einer Welle, 2000 Stunden in einer Bohrung mit Dichtung ohne Schmiermittelverlust zu drehen, definiert. Als Spezifikationsoperator ist für die Welle ein Durchmesser von 30 mm mit einer Toleranz h7 angegeben. Zusätzlich ist die Rauheit begrenzt mit  $R_a$  1,5  $\mu\text{m}$ . Die Übereinstimmungsunsicherheit, abgeleitet für dieses Beispiel, bedeutet: Ist eine Welle, die der Spezifikation entspricht, in der Lage, eine Drehbewegung über 2000 Stunden ohne Schmiermittelverlust sicherzustellen oder nicht und kann sie die Funktion nicht erfüllen, wenn sie nicht der Spezifikation entspricht?

Diese Unsicherheit wird von den Möglichkeiten der Funktionsbeschreibung mit den Festlegungen im GPS-System und von den Kenntnissen des Konstrukteurs beeinflusst und liegt in der Verantwortung desselben (siehe Grundsätze im Kapitel 3.3).

#### 4.7.3 Spezifikationsunsicherheit

Die Spezifikationsunsicherheit ist die Unsicherheit des tatsächlichen Spezifikationsoperators. Sie entsteht, wenn aufgrund eines unvollständigen Spezifikationsoperators Mehrdeutigkeiten bei der Interpretation der Spezifikation auftreten und mehrere Möglichkeiten zu einem Ergebnis führen. Dieser Zusammenhang ist in Bild 42 aufgezeigt.

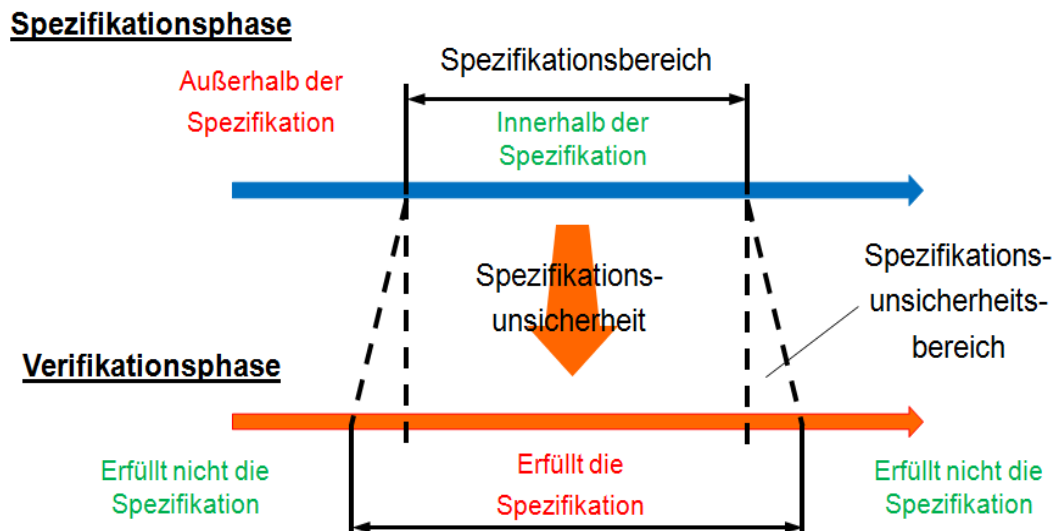


Bild 42: Spezifikationsunsicherheit vergrößert die Toleranzzone [nach Nie12]

Als Spezifikationsunsicherheit wird der Wert bestimmt, der den Bereich der möglichen Ergebnisse begrenzt. Fehlen z. B. in der Spezifikation die Festlegungen zum Assoziationskriterium und ist in den GPS-Standardfestlegungen kein solches festgelegt, dann entsteht eine Spezifikationsunsicherheit, wenn mehrere Assoziationskriterien möglich sind. Somit ist auch die Spezifikationsunsicherheit in der Verantwortung des Konstrukteurs und wird zudem beeinflusst von der Vollständigkeit der GPS-Standardfestlegungen.

#### 4.7.4 Messunsicherheit

Das Ziel jeder Messung ist die Bestimmung eines Wertes. Aufgrund der unterschiedlichsten Einflüsse ist es jedoch unmöglich, den wahren Wert der Größe zu bestimmen. Deshalb wird die Unsicherheit einer Messung bestimmt, um den Bereich, in dem der wahre Wert liegt, darzustellen.

Im GPS-System ist in der DIN EN ISO 14253 Teil 1 [14253-1] die Berücksichtigung der Messunsicherheit beim Konformitätsnachweis gefordert. Die Messunsicherheit muss bekannt sein, um das Bauteil anzunehmen oder abzuweisen. In der Norm wird zur Vereinfachung von Lieferbeziehungen der Spezifikationsbereich um die Messunsicherheit erweitert oder verringert. Dies ist davon abhängig, ob beim Hersteller der Verifikationsprozess (Bild 43) oder Kunden (Bild 44) erfolgt. Damit wird auch die

Verantwortung für den Konformitätsnachweis, wie bereits im Grundsatz der Verantwortlichkeit in der DIN EN ISO 8015 im Kapitel 3.3.14 beschrieben, festgelegt.

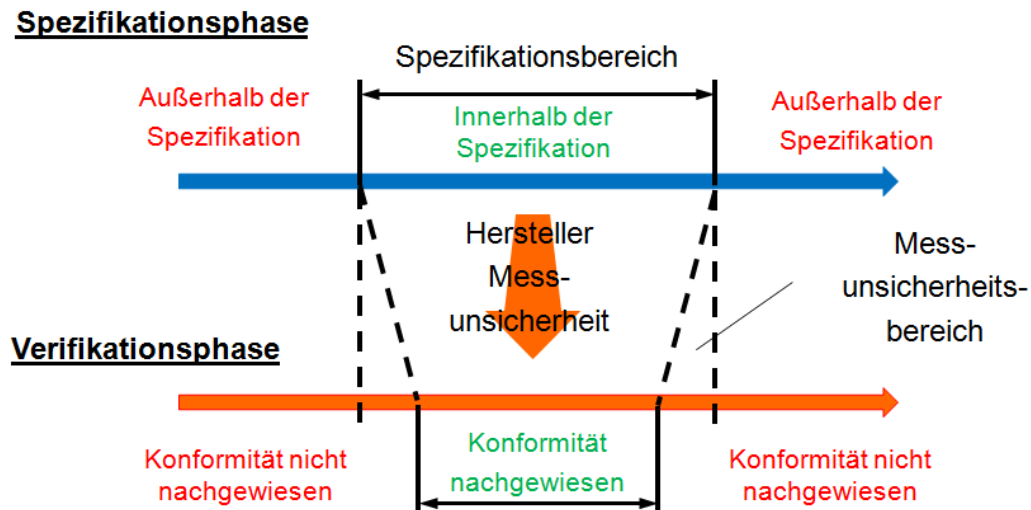


Bild 43: Einschränkung der Konformitätszone durch die Messunsicherheit beim Hersteller [nach Nie12]

Wird der Nachweis bei Kunden erbracht (siehe Bild 44), dann vergrößert sich der Bereich, in dem nicht nachgewiesen werden kann, dass das Bauteil außerhalb der Spezifikation ist.

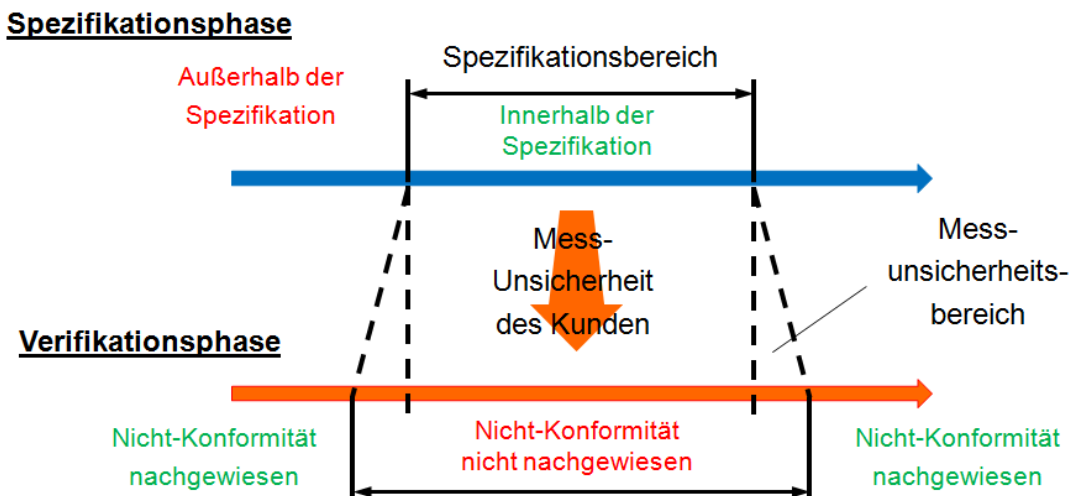


Bild 44: Erweiterung der Konformitätszone durch die Messunsicherheit beim Lieferanten [nach Nie12]

Die Messunsicherheit ist definiert im ISO/IEC "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM) [GUM, 13005]. Die Vorgehensweise zur Berechnung der

Messunsicherheit wird in [Kry12] beschrieben. Im Rahmen des GPS-Konzeptes ist die Messunsicherheit die Summe aus der Verfahrens- und Umsetzungsunsicherheit [17450-2(D)].

#### 4.7.5 Verfahrensunsicherheit

Für die Verfahrensunsicherheit ist derjenige verantwortlich, der den tatsächlichen Verifikationsoperator, abgeleitet aus dem tatsächlichen Spezifikationsoperator, festlegt. Die mögliche Differenz zwischen den beiden Operatoren entspricht der Verfahrensunsicherheit. Dabei wird die Unsicherheit, die sich aus der tatsächlichen Messung ergibt, nicht berücksichtigt.

#### 4.7.6 Umsetzungsunsicherheit

Die Umsetzungsunsicherheit entsteht aus dem Unterschied zwischen dem tatsächlichen und dem idealen Prüfungsoperator und wird z. B. von den Eigenschaften des Messgerätes, der Kalibrierung und den Umweltbedingungen beeinflusst. Unzulänglichkeiten der physikalisch am Messgerät vorhandenen Bauteile, z. B. Spindelsteigungsfehler oder Führungsbahnabweichungen werden der Umsetzungsunsicherheit zugeordnet. Mit der Kalibrierung wird angestrebt, die Eigenschaften des Messgerätes zu kontrollieren, um die Umsetzungsunsicherheit zu reduzieren, zu kontrollieren oder zu eliminieren. Die Umsetzungsunsicherheit wird heute üblicherweise als Messunsicherheit verstanden.

#### 4.7.7 Entsprechungsunsicherheit

Die Entsprechungsunsicherheit ist die Summe der Spezifikationsunsicherheit und der Messunsicherheit. Im Normenentwurf der DIN EN ISO 17450 Teil 2 [17450-2(D)] ist festgelegt, dass die Entsprechungsunsicherheit „*die Unsicherheit, mit der bewiesen werden kann, dass ein Werkstück mit allen möglichen Interpretationen der Spezifikation übereinstimmt*“, quantifiziert. Wie oben bereits beschrieben, ist eine Spezifikation unsicher, wenn kein Assoziationskriterium festgelegt ist. Die Festlegung des idealen Prüfungsoperators würde demzufolge die Auswahl eines Assoziationskriteriums und ein zum Nachweis geeignetes Messgerät und Messverfahren erfordern. Ist das Messgerät für das gewählte Assoziationskriterium geeignet, wird die Messunsicherheit nur noch

von der Umsetzungsunsicherheit beeinflusst. Die Entsprechungsunsicherheit setzt sich in diesem Fall aus der Spezifikationsunsicherheit und der Umsetzungsunsicherheit zusammen.

Mit der Darstellung der Unsicherheiten werden die Beschreibungen zu den Globalen GPS-Normen abgeschlossen. Die weiteren Ausführungen zu den Allgemeinen GPS-Normen zeigen speziell die für die funktionsgerechte Spezifikation festgelegten Regeln und Symbole zur Einschränkung geometrischer Eigenschaften.

## 5 Allgemeine GPS-Normen

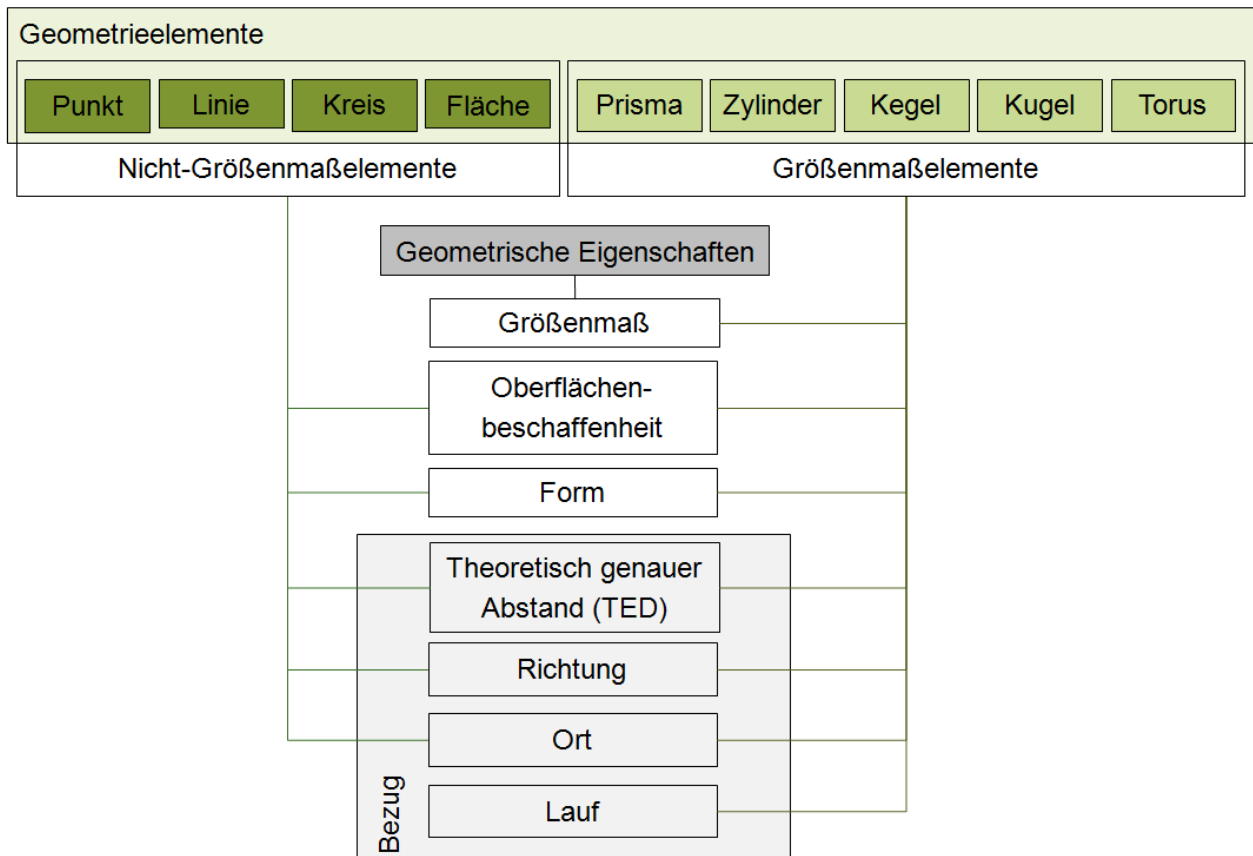
### 5.1 Spezifikation geometrischer Eigenschaften

Die Allgemeinen GPS-Normen regeln die Spezifikation und Verifikation der geometrischen Eigenschaften. In Tabelle 12 ist der Bereich der Spezifikation in der Allgemeinen GPS-Matrix gekennzeichnet. Die Kettenglieder 1 bis 3 werden in den folgenden Abschnitten betrachtet.

*Tabelle 12: Allgemeine GPS-Matrix mit Kennzeichnung der Kettenglieder für die Spezifikation [nach 32950]*

Kettengliednummer	1	2	3	4	5	6
Geometrische Eigenschaften	Angaben der Produkt-dokumenten-codierung	Definition der Toleranzen – Theoretische Definition der Werte	Definition der Eigenschaften des Istformelementes	Ermittlung der Abweichungen des Werkstückes	Anforderungen an Messeinrichtungen	Kalibrieranforderungen - Kalibrier normen
1. Größenmaß						
2. Abstand						
3. Radius						
4. Winkel						
5. Form einer Linie bezugsunabhängig						
6. Form einer Linie bezugsabhängig						
7. Form einer Oberfläche bezugsunabhängig						
8. Form einer Oberfläche bezugsabhängig						
9. Richtung						
10. Ort						
11. Lauf						
12. Gesamtlauf						
13. Bezüge						
14. Rauheitsprofil						
15. Welligkeitsprofil						
16. Primärprofil						
17. Oberflächen-defekte						
18. Kanten						

Aktuell sind in der Allgemeinen GPS-Matrix [32950] als geometrische Eigenschaften Maß (Größenmaß), Abstand, Radius, Winkel, Form einer Linie und Form einer Fläche, jeweils bezugsunabhängig und -abhängig, Richtung, Lage (Ort), Rundlauf, Gesamtlauf, Bezüge, Rauheit, Welligkeit, Grundprofil, Oberflächenfehler und Kanten festgelegt. Diese Einteilung ist nicht logisch. Eine Ableitung der geometrischen Eigenschaften aus den aktuell definierten Regeln für die Spezifikation, den idealen Geometrieelementen und den Ansätzen zur Definition von Merkmalen [Cha12, Nie12, Hen12] unterstützt die Darstellung der Spezifikationsmöglichkeiten anschaulicher.



*Bild 45: Neue Unterteilung der geometrischen Eigenschaften*

Im Kapitel 4.3.1 sind die idealen Geometrieelemente als Punkt, Linie, Fläche und Volumen beschrieben. Eine weitere Detaillierung enthält Tabelle 6 im Kapitel 4.3.2 mit den Invarianzklassen für die verschiedenen Geometrieelemente und deren Situationselemente. Es sind Punkt, Gerade, Schraubenlinie, Kreis, Ebene, Zylinder, Kegel, Kugel, Torus, Prisma und komplexe Geometrieelemente beschrieben. Die neue

Unterteilung der geometrischen Eigenschaften im Bezug zu den Geometrieelementen ist in Bild 45 dargestellt. Die Schraubenlinie und die komplexen Geometrieelemente werden nicht mit betrachtet.

Eine entscheidende Neuerung gegenüber der bisherigen Betrachtungsweise ist die Einteilung in Nicht-Größenmaßelemente und Größenmaßelemente. Das Größenmaß ist eine spezielle Eigenschaft von Größenmaßelementen. Die Geometrieelemente können entsprechend der nicht-gebundenen Invarianzgrade mit Angaben zu Oberflächenbeschaffenheit, Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen begrenzt werden. Dabei müssen die Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen am Bauteil zu einem Bezug, der das Koordinatensystem des Bauteils definiert, festgelegt werden (Bild 46). Lauftoleranzen können nur für Größenmaßelemente festgelegt werden.

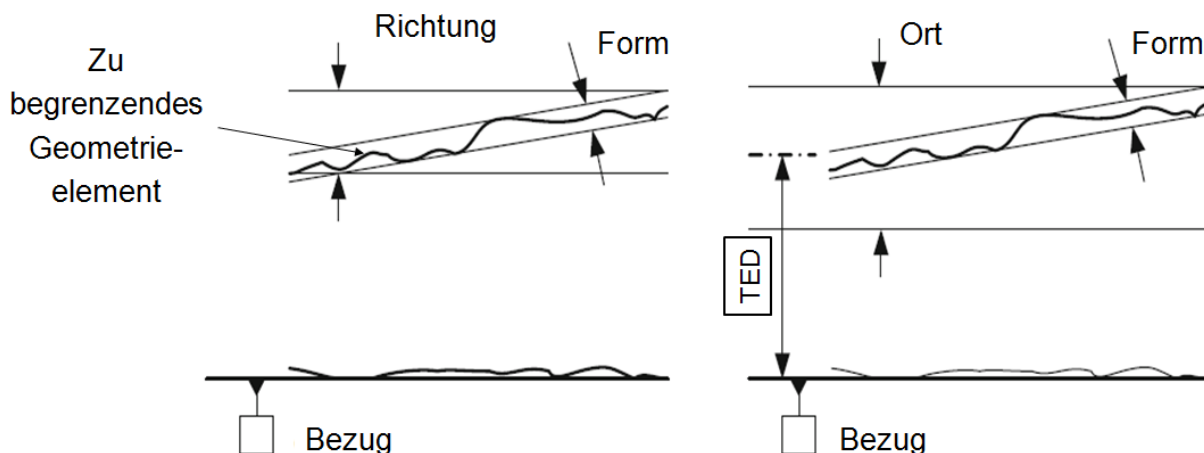


Bild 46: Richtung und Ort eines Geometrieelementes zu einem Bezug [nach Zha11]

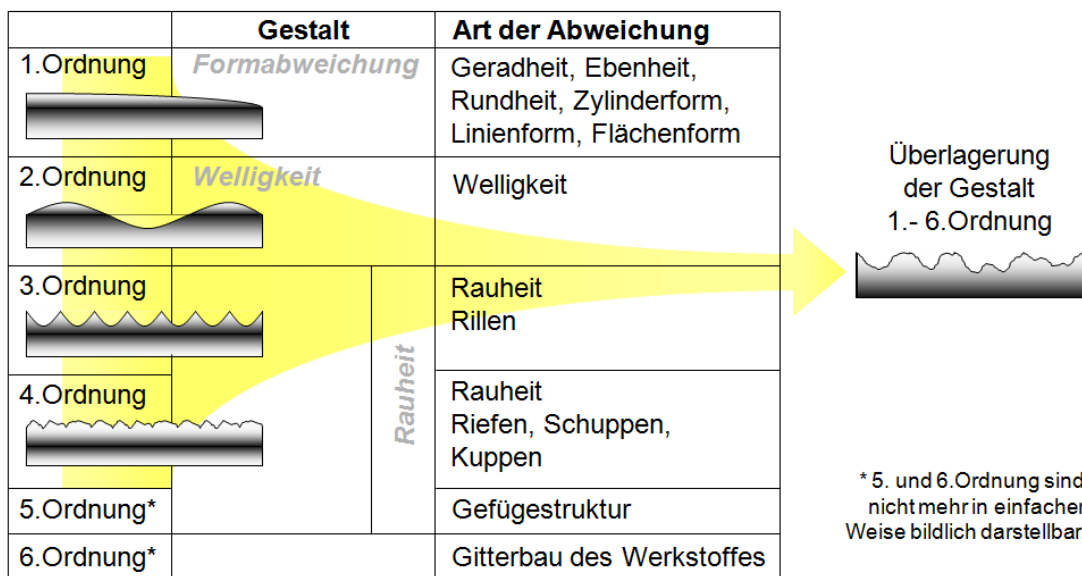
Der theoretisch genaue Abstand (TED) legt die Nennposition des Geometrieelementes gegenüber dem Koordinatensystem des Bauteils fest. Mit einer Toleranzzone werden die Abweichungen von dieser Nennposition begrenzt.

Die Notwendigkeit, zwischen einem Maß als Abstand und dem Größenmaß eines Größenmaßelementes zu unterscheiden, führte zur Definition des Abstandes in der DIN EN ISO 14405 Teil 2 [14405-2] als: „Maß zwischen zwei geometrischen Elementen, die nicht als Maßelemente angesehen werden“, dabei kann „der Abstand zwischen zwei vollständigen Geometrieelementen oder einem vollständigen und einem abgeleiteten



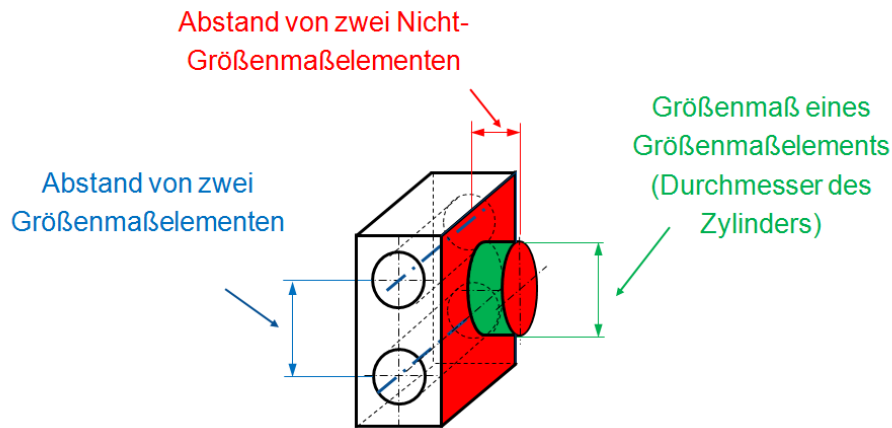
*Geometrieelement oder zwischen zwei abgeleiteten Geometrieelementen festgelegt sein“.* Für Nicht-Größenmaßelemente wird der Abstand direkt für das Geometrieelement definiert. Für Größenmaßelemente wird der Abstand als Nennposition seines abgeleiteten Geometrieelements, welches die Eigenschaften eines Nicht-Größenmaßelementes hat, festgelegt.

Die in der Allgemeinen GPS-Matrix enthaltenen geometrischen Eigenschaften können der neuen Unterteilung zugeordnet werden. Kanten und Winkel sind Eigenschaften von Flächen. Der Radius wird als Kreissegment beschrieben. Oberflächendefekte, Rauheit, Welligkeit, Grundprofil und Primärprofil gehören zur Oberflächenbeschaffenheit, wobei die Welligkeit auch in der Form enthalten ist. Im Ordnungssystem für Gestaltabweichungen aus dem Jahr 1982 (Bild 47) [4760] ist der Zusammenhang von Form, Welligkeit und Rauheit dargestellt.



*Bild 47: Ordnungssystem für Gestaltabweichungen [4760]*

Mit der Plus-Minus-Tolerierung, die bereits zu Beginn der Arbeit vorgestellt wurde, wird nicht zwischen Größenmaß und Abständen unterschieden. Zum besseren Verständnis dieser Begriffsunterscheidung wurden in Bild 48 Abstände und ein Größenmaß eingetragen.



*Bild 48: Unterscheidung von Größenmaß und Abstand*

Dieser neue Ansatz zur Unterteilung der geometrischen Eigenschaften sollte die Grundlage für eine neue GPS-Matrix sein. Die nachfolgenden Abschnitte orientieren sich an dieser neuen Unterteilung.

## 5.2 Größenmaßelemente

### 5.2.1 Definition Größenmaß am Größenmaßelement

Als Größenmaß eines Größenmaßelementes wird z. B. der Durchmesser eines Zylinders oder einer Kugel oder der Abstand zweier paralleler gegenüberliegender Ebenen an einem Prisma bezeichnet [14405-1]. Diese Definitionen wurden bereits in Kapitel 4.3.2 unter Maßparameter beschrieben. Für diese Größenmaßelemente können verschiedene Größenmaße definiert werden.

Die Eintragung der Größenmaße erfolgt nach den Regeln der DIN 406-11 [406-11] und ISO 129 [129]. Ein Größenmaß wird entsprechend dieser Normen über einer Maßlinie oder an einer Hinweislinie angetragen. Toleranzen können auf verschiedene Arten dargestellt werden. Einige Möglichkeiten enthalten die nachfolgenden Ausführungen. Für weitere Eintragsvarianten wird auf die angeführten Normen verwiesen.

Entsprechend dem Unabhängigkeitsprinzip gilt auf allen Zeichnungen ohne den Hinweis auf andere Festlegungen das Zweitpunktmaß als örtliches Größenmaß für den Standardspezifikationsoperator [14405-1]. Mit Modifikationssymbolen kann diese Festlegung zur Interpretation der Toleranz verändert werden. Die in der Norm DIN EN

ISO 14405 Teil 1 [14405-1] festgelegten Spezifikations-Modifikationssymbole für Größenmaße enthält die Tabelle 13.

*Tabelle 13: Modifikationssymbole für Größenmaße und deren Beschreibung [14405-1]*

<b>Modifikator</b>	<b>Beschreibung</b>
LP	Zweipunktmaß
LS	Örtliches Maß, festgelegt durch eine Kugel
GG	Assoziationskriterium nach der „Methode der kleinsten Quadrate“
GX	Assoziationskriterium „größtes einbeschriebenes Geometrieelement“
GN	Assoziationskriterium „kleinstes umschriebenes Geometrieelement“
CC	Umfangsbezogener Durchmesser
CA	Flächenbezogener Durchmesser
CV	Volumenbezogener Durchmesser
SX	Größtes Rangordnungsmaß
SN	Kleinstes Rangordnungsmaß
SA	Mittelwert des Rangordnungsmaßes
SM	Median des Rangordnungsmaßes
SD	Mittlerer Wert der Spanne des Rangordnungsmaßes
SR	Spanne des Rangordnungsmaßes

Die Erläuterungen der einzelnen Größenmaße folgen in den weiteren Abschnitten.

### *5.2.2 Örtliche Größenmaße von Größenmaßelementen*

Als örtliche Größenmaße sind Zweipunktmaß, sphärisches Maß, Querschnittsmaß und Teilbereichsmaß definiert, die „*per Definition ein mehrdeutiges Ergebnis der Auswertung*“ zulassen [14405-1]. Das Zweipunktmaß gilt ohne zusätzliche

Kennzeichnung, wenn das Unabhängigkeitsprinzip gilt oder wenn nach dem Größenmaß und der Toleranz das Modifikationssymbol LP (siehe Bild 49) eingetragen ist. Das Zweipunktmaß ist definiert als: „*Abstand zwischen zwei einander gegenüberliegenden Punkten auf dem Maßelement.*“

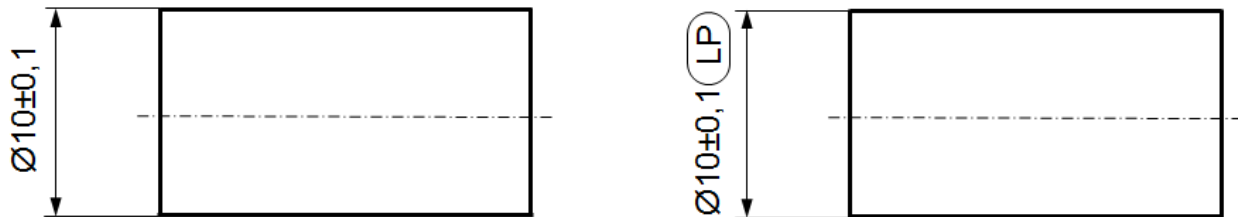


Bild 49: Spezifikation des Zweipunktmaßes

Bei einer Toleranz von  $10\text{mm} \pm 0,1\text{mm}$  muss das reale Zweipunktmaß im Bereich von 9,9 mm bis 10,1 mm am Bauteil liegen, um die Toleranz einzuhalten. Im Bild 50 sind mehrere Zweipunktmaße und die Toleranzgrenzen dargestellt. Es wird verdeutlicht, dass das Zweipunktmaß rechtwinklig zur mittleren Linie des assoziierten Zylinders bestimmt werden muss und die Verbindungslinie zwischen den Punkten den assoziierten Kreismittelpunkt berührt. Dies ist in der DIN EN ISO 14660-2 [14660-2] definiert. Der assoziierte Zylinder entspricht dem Zylinder der kleinsten Abweichungsquadrate (siehe Globale Größenmaße).

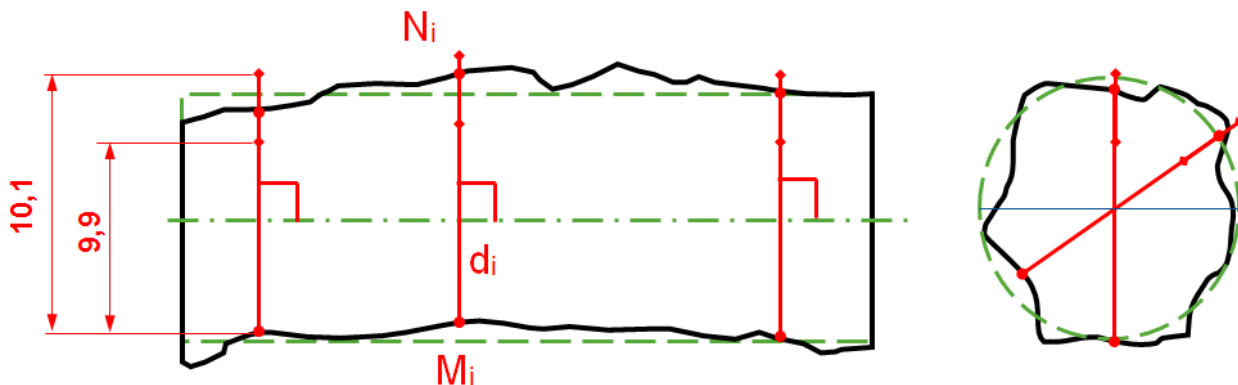


Bild 50: Mehrere Zweipunktmaße an einem Zylinder ( $d_i$ : Durchmesser;  $N_i$  und  $M_i$ : Messpunkte an der Stelle  $i$ ) [nach Cha12]

Der „Durchmesser der größten einbeschriebenen Kugel“ ist definiert als das sphärische Maß. Es kann durch Eintragung des Modifikationssymbols LS festgelegt werden.

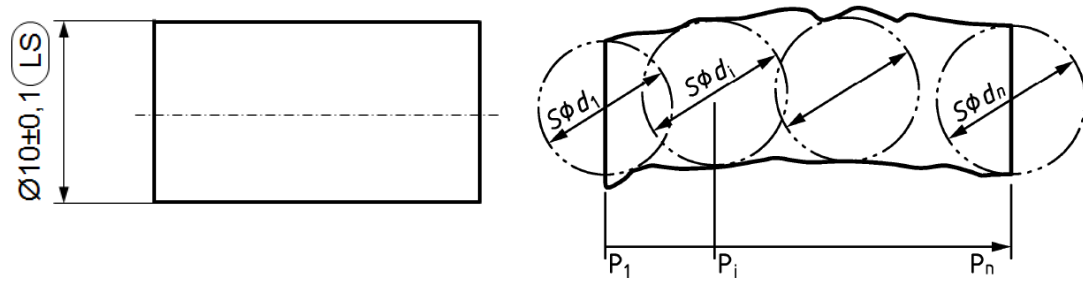


Bild 51: Definition sphärisches Maß ( $S\phi d_{1-n}$ : Kugeldurchmesser am Punkt  $P_{1-n}$ )

[14405-1]

Das Querschnittsmaß wird von assoziierten Geometrieelementen oder berechneten Maßen abgeleitet. Es ist definiert als „globales Maß für einen gegebenen Querschnitt des erfassten Geometrieelements“.

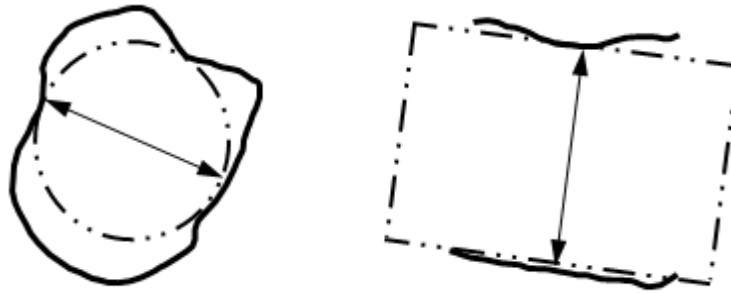
Tabelle 14: Weitere Spezifikations-Modifikationssymbole und deren Beschreibung

[14405-1]

Beschreibung	Symbol	Verweis	Beispiel für die Zeichnungseintragung
Hüllbedingung	Ⓔ	6.2.2	$10 \pm 0,1$ Ⓔ
ein beliebiger beschränkter Teilbereich des Geometrieelements	/Länge	7.3	$10 \pm 0,1$ Ⓔ/5
eine beliebige Querschnittsfläche	ACS	7.4	$10 \pm 0,1$ Ⓔ ACS
festgelegte Querschnittsfläche	SCS	7.5	$10 \pm 0,1$ Ⓔ SCS
mehr als ein Geometrieelement	Anzahl ×	7.6 7.7	$2 \times 10 \pm 0,1$ Ⓔ
gemeinsame Toleranz	CT	7.7	$2 \times 10 \pm 0,1$ Ⓔ CT
Bedingung des freien Zustandes	Ⓕ	7.8	$10 \pm 0,1$ Ⓔ Ⓕ
zwischen	↔	7.2 bis 7.4	$10 \pm 0,1$ A ↔ B

Die globalen Maße werden im nächsten Kapitel weiter ausgeführt. Für die Spezifikation des Querschnittsmaßes und des Teilbereichsmaßes sind darüber hinaus weitere Spezifikations-Modifikationssymbole notwendig, die in Tabelle 14 zusammengefasst sind. Die Hüllbedingung, gekennzeichnet mit einem Ⓔ hinter der Maßeintragung, ist eine abhängige Maßtoleranz und wird im Kapitel 5.7.2 erläutert.

Im Bild 52 ist das Querschnittsmaß aus dem durch Assoziation gebildeten maximal einbeschriebenen Geometrieelement bestimmt.



*Bild 52: Beispielhafte Darstellung des Querschnittsgrößenmaßes [14405-1]*

In der technischen Zeichnung würde diese Spezifikation die Eintragung der Modifikatoren GX und ACS hinter dem Größenmaß erfordern. Weitere Möglichkeiten der Spezifikation des Querschnittsgrößenmaßes enthält Tabelle 15. In dieser Tabelle sind auch die Möglichkeiten zur Spezifikation von Teilbereichsgrößenmaßen aufgezeigt. Das Teilbereichsgrößenmaß ist definiert [14405-1] als: „*globales Maß für einen gegebenen Teilbereich des erfassten Geometrieelements*“. Die Eintragung in der Zeichnung erfolgt mit der Angabe des Assoziationskriteriums und der Länge, für die dieses Größenmaß gilt, getrennt durch einen Schrägstrich (siehe Tabelle 14 und Tabelle 15 ).

Tabelle 15: Spezifikations-Modifikationssymbole für örtliche Maße [14405-1]

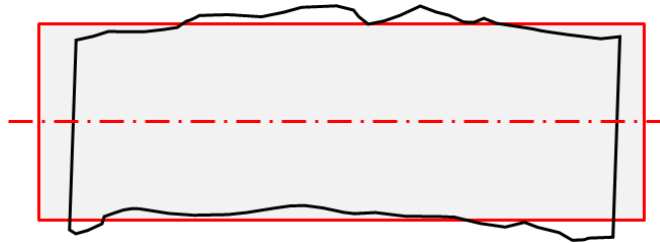
Art des Maßmerkmals	Unterart	zusätzliche Festlegungen	zugeordnete Modifikationssymbole
örtliches Maß	Zweipunktmaß		(LP)
	sphärisches Maß		(LS)
	Querschnittsmaß	mit dem Kriterium nach der Methode der kleinsten Quadrate	(GG) ACS
		mit dem Kriterium größtes einbeschriebenes Geometrielement	(GX) ACS
		mit dem Kriterium kleinstes umschriebenes Geometrielement	(GN) ACS
		berechnetes Maß mit umfangsbezogenem Durchmesser	(CC)
		berechnetes Maß mit flächenbezogenem Durchmesser	(CA)
		Rangordnungsmaß des sphärischen Maßes oder des Zweipunktmaßes	Beispiel: (LS) ACS (SA)
örtliches Maß	Teilbereichsmaß der Länge $L$	mit dem Kriterium nach der Methode der kleinsten Quadrate	Beispiel: (GG)/20
		mit dem Kriterium größtes einbeschriebenes Geometrielement	Beispiel: (GX)/15
		mit dem Kriterium kleinstes umschriebenes Geometrielement	Beispiel: (GN)/30
		berechnetes Maß mit volumenbezogenem Durchmesser	Beispiel: (CV)/10
		<b>Rangordnungsmaß des sphärischen Maßes oder des Zweipunktmaßes</b>	Beispiel: (LS)/20 (SX)

Neben den örtlichen Maßen müssen die globalen Größenmaße betrachtet werden.

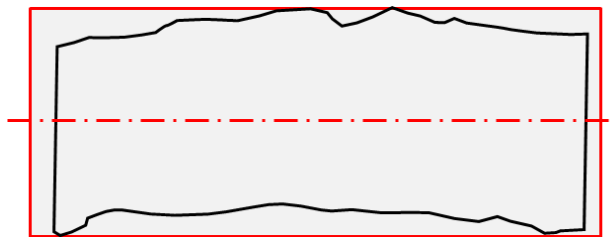
### 5.2.3 Globale Größenmaße von Größenmaßelementen

Die globalen Größenmaße werden hinsichtlich direkt und indirekt unterschieden und führen zu einem eindeutigen Ergebnis. Das direkte globale Größenmaße ist definiert

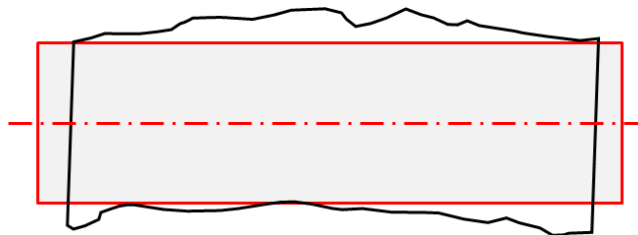
[14405-1] als „Maß des assoziierten Geometrieelements, das vom selben geometrischen Typ ist, wie das Maßelement“. Die Operation Assoziation wurde bereits im Kapitel 4.4.5 beschrieben. In dieser Norm werden drei Assoziationskriterien für die Größenmaßdefinition verwendet. Es wird unterschieden in Größenmaß nach der Methode der kleinsten Quadrate, größtes einbeschriebenes Größenmaß und kleinstes umschriebenes Größenmaß. Beispielhaft sind diese Größenmaße am Zylinder im Bild 53, Bild 54 und Bild 55 dargestellt.



*Bild 53: Darstellung des Größenmaßes nach der Methode der kleinsten Quadrate an einem Zylinder*



*Bild 54: Darstellung des kleinsten umschriebenen Größenmaßes an einem Zylinder*

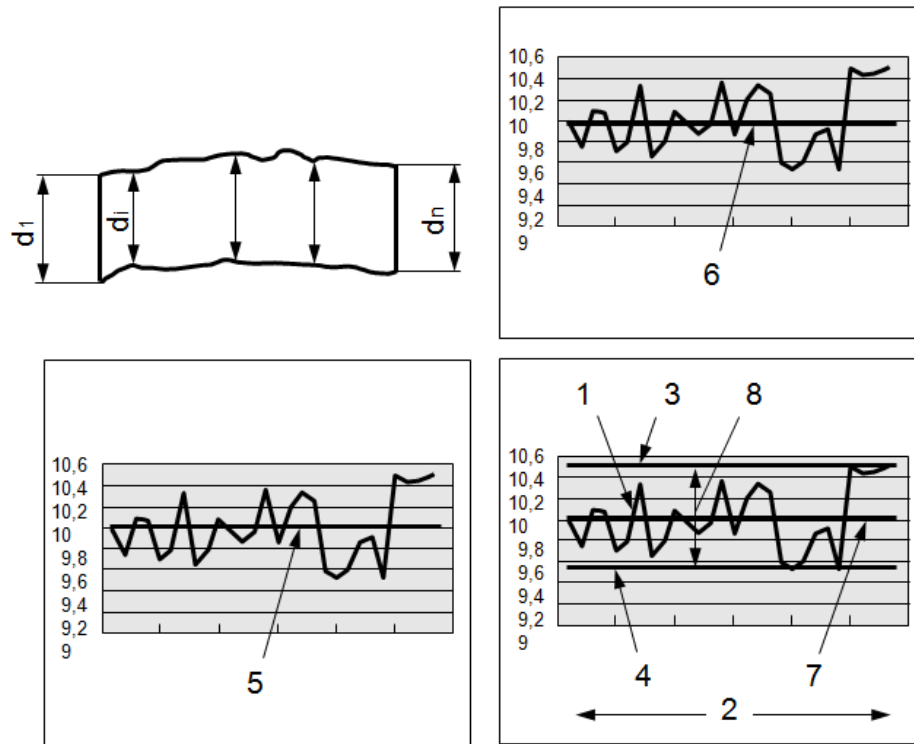


*Bild 55: Darstellung des größten einbeschriebenen Größenmaßes an einem Zylinder*

Indirekte globale Größenmaße werden in berechnete Größenmaße und Rangordnungsmaße unterschieden. Die berechneten Größenmaße sind definiert als: „Maß, erhalten unter Anwendung mathematischer Formeln, das das intrinsische Merkmal eines Geometrieelements einem anderen Maß (anderen Maßen) desselben Geometrieelements zuordnet.“ Derzeit in der DIN EN ISO 14405 Teil 1 [14405-1] definiert sind der flächen-, umfangs- und volumenbezogene Durchmesser.



Ein Rangordnungsmaß kennzeichnet ein Größenmaßmerkmal, welches durch mathematische Regeln aus einer „homogene(n) Menge von Werten bezüglich eines örtlichen Maßes“ an einem Größenmaßelement erhalten wird [14405-1]. Mit Rangordnungsmaßen können z. B. indirekte globale Größenmaße durch örtliche Größenmaße näher beschrieben werden.



d Werte des örtlichen Größenmaßes

1 Menge der Werte des örtlichen Größenmaßes

2 Abszisse bezüglich der Position entlang der Achse

3 größtes Maß (= 10,497)

4 kleinstes Maß (= 9,542)

5 Mittelwert des Maßes (= 10,011)

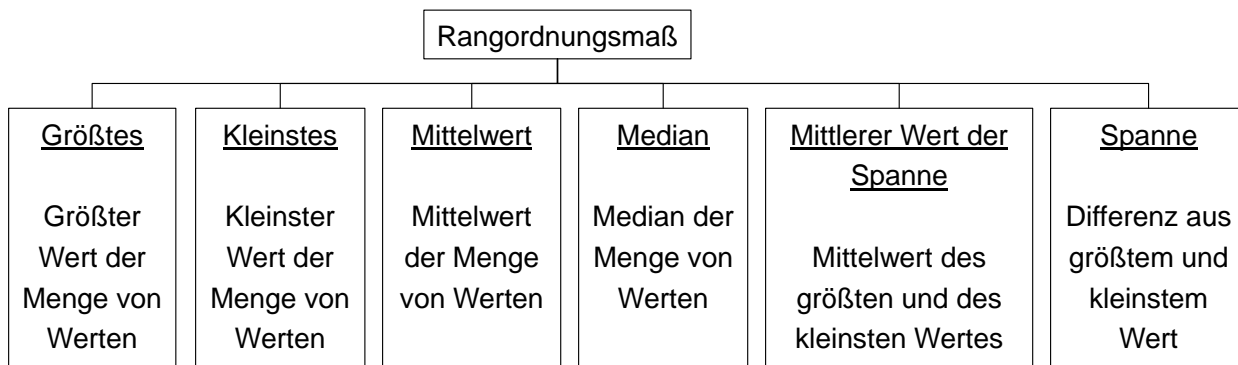
6 Median des Maßes (= 9,969)

7 mittlerer Wert der Spanne (= 10,020)

8 Spanne des Maßes (= 0,955)

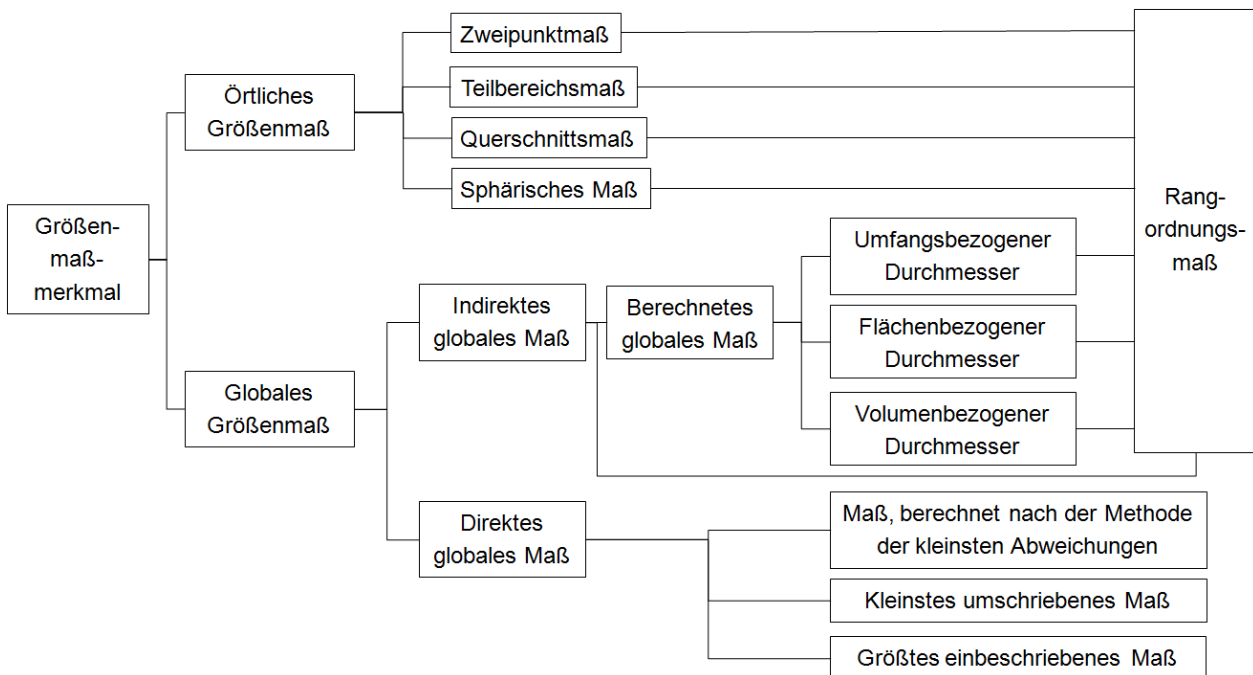
*Bild 56: Darstellung der verschiedenen Rangordnungsmaße für einen Zylinder [14405-1]*

Die im Bild 57 zusammengefassten Rangordnungsmaße sind beispielhaft in Bild 56 für einen Zylinder dargestellt.



*Bild 57: Einteilung der Rangordnungsmaße mit Kurzbeschreibung entsprechend der Definitionen in DIN EN ISO 14405 Teil 1 [14405-1]*

Das folgende Bild 58 gibt einen Überblick über die in der DIN EN ISO 14405 Teil 1 [14405-1] definierten Größenmaße für Größenmaßelemente.



*Bild 58: Überblick über die in DIN EN ISO 14405 Teil 1 [14405-1] definierten Größenmaße*

Seit vielen Jahren existiert ein System, die Paarungsfunktion von zwei Größenmaßelementen mit einem Passungssystem zu vereinfachen. Dafür werden örtliche und globale Größenmaße definiert.

### 5.2.4 Toleranzsystem für Größenmaßelemente

Für Zylinder und zwei gegenüberliegende parallele Flächen wurde ein besonderes Toleranzsystem in der DIN EN ISO 286 Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen [286-1] und Teil 2: Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen [286-2] definiert. Grundgedanke dieses Systems ist die Vereinfachung der Paarung von zwei Größenmaßelementen, die das gleiche Nennmaß haben und verschiedene Funktionsanforderungen erfüllen müssen.

Es werden Passungen in Spiel-, Übergangs- und Übermaßpassung unterschieden. Als Passung ist der *„Zusammenhang zwischen einem äußeren und einem inneren Maßelement (Bohrung und Welle der gleichen Art), die zusammengefügt werden“*, beschrieben [286-1]. Zur Vereinfachung wird in diesem Abschnitt das innere Größenmaßelement Zylinder als Bohrung und das äußere Größenmaßelement Zylinder als Welle bezeichnet. Zusätzlich wurden die Einheitswelle, für die das obere Nennmaß Null ist, und die Einheitsbohrung mit dem unteren Nennmaß Null eingeführt. Die Toleranzgrenzen werden als Mindestmaß (lower limit of size) LLS und Höchstmaß (upper limit of size) ULS bezeichnet.

Nennmaß mm		Grundtoleranzgrade											
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10
über	bis einschließ- lich	Grundtoleranzen											
		µm											
—	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140

Bild 59: Ausschnitt aus der Tabelle der Grundtoleranzgrade [286-1]

Die Festlegung der Toleranz erfolgt über den Toleranzgrad IT (International Tolerance), mit der Gradnummer und dem Grundabmaß. Mit der Gradnummer werden

Grundtoleranzen für Nennmaße festgelegt (siehe Bild 59). Die Größe des Toleranzintervalls wird aus dem Nennmaß und dem Toleranzgrad bestimmt.

Das Grundabmaß legt die Lage des Toleranzfeldes gegenüber dem Nennmaß fest und wird mit einem Buchstaben gekennzeichnet. Die Kennzeichnung erfolgt mit:

- Großbuchstaben für Bohrungen (A ... ZC) und
- Kleinbuchstaben für Wellen (a ... zc).

Das Toleranzsystem für die Einheitsbohrung (Bild 60) und Einheitswelle (Bild 61) bildet die Grundlage des ISO-Passungssystems.

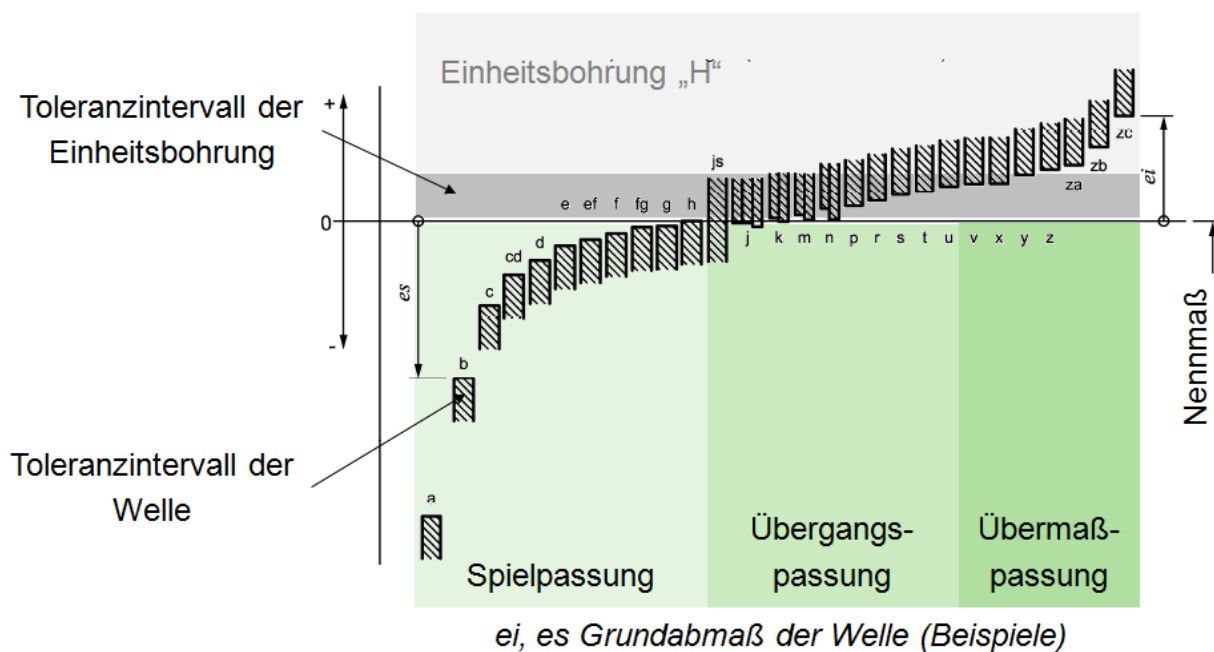
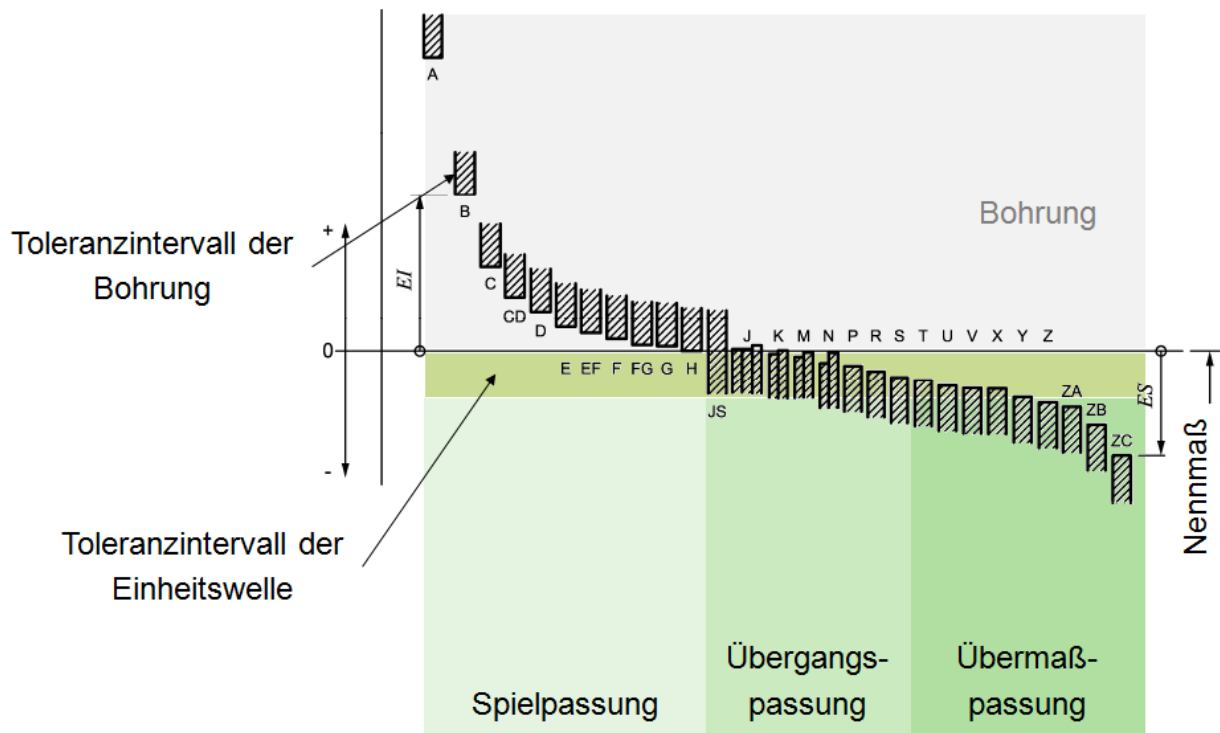


Bild 60: Toleranzsystem für Einheitsbohrung [nach 286-1]

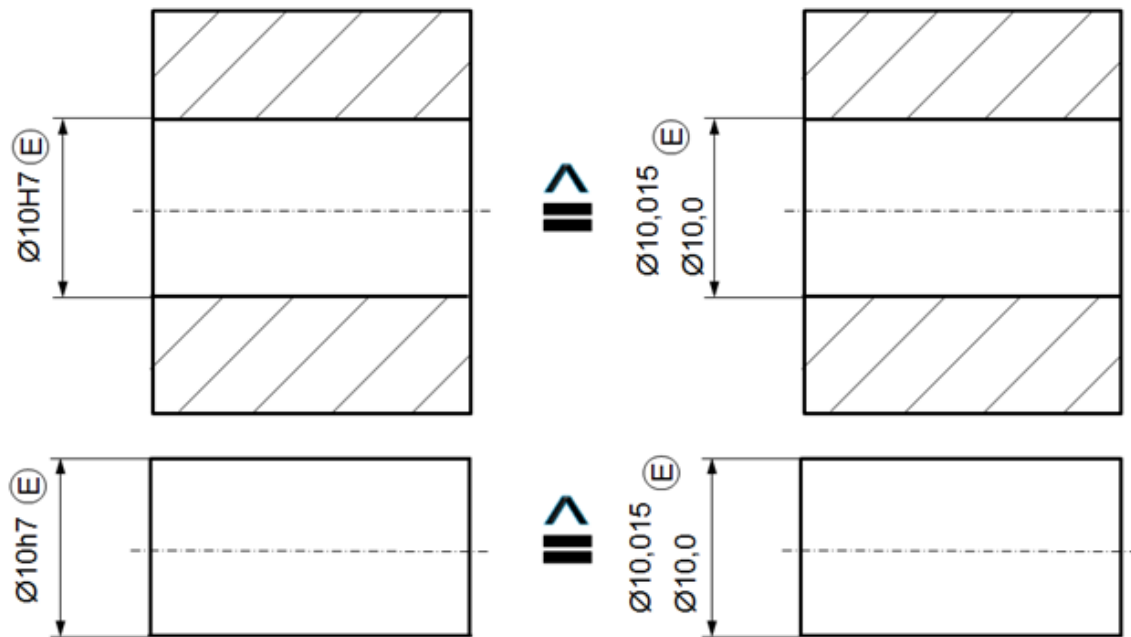


*EI, ES Grundabmaß der Bohrung (Beispiele)*

*Bild 61: Toleranzsystem für Einheitswelle [nach 286-1]*

Dieses Toleranzsystem wird auch als Lehren- und Passungssystem bezeichnet und, wie der Begriff bereits ausdrückt, auch zur Vereinfachung der Verifikation mit Lehren als idealgeometrische Elemente entwickelt, die das Paarungsverhalten abbilden.

Mit der Einführung des Unabhängigkeitsprinzips muss das Größenmaßelement besonders gekennzeichnet werden, damit die Funktion der Paarung ausgedrückt werden kann. Wie bereits im Zusammenhang mit den Größenmaßen und in Kapitel 5.7.2 weiter beschrieben, wird dafür die Hüllbedingung mit dem  $\oplus$  hinter der Größenmaßtoleranz eingetragen (Bild 62). Die Eintragung des Grundabmaßes und des Toleranzgrades erfolgt nach dem Nennmaß.



*Bild 62: Einheitsbohrung und Einheitswelle mit alternativer Darstellung und der Eintragung der Hüllbedingung*

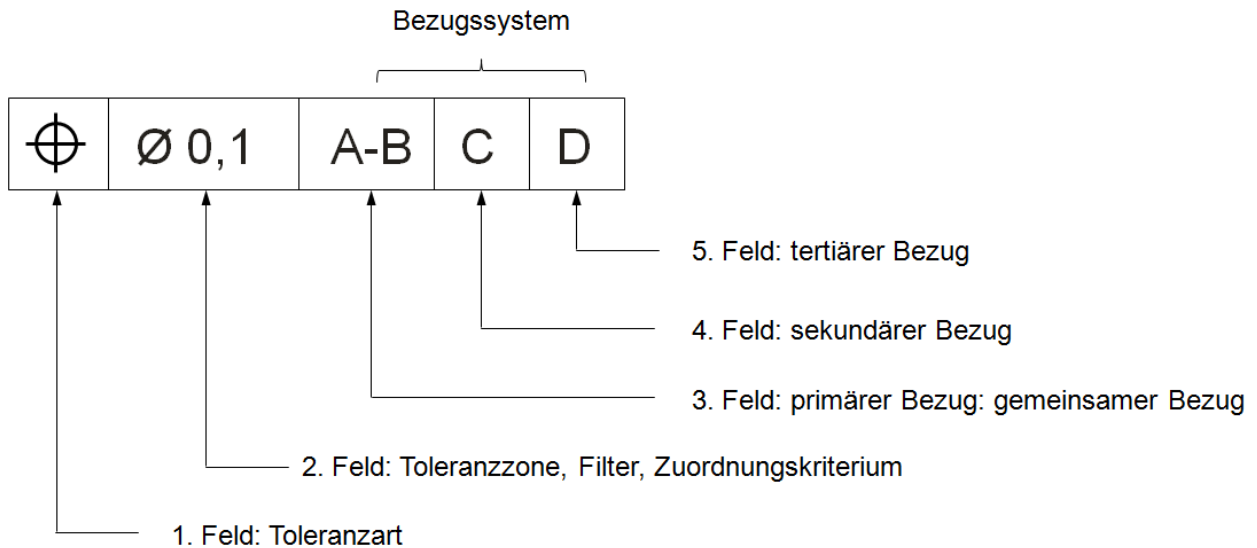
Die Richtung, der Ort und Lauf von Größenmaßelementen in Beziehung zu anderen Geometrieelementen erfordert die Festlegung eines theoretisch genauen Abstandes der Toleranzzone zu einem Bezugssystem (siehe Kapitel 5.5). Zusätzlich können die Eigenschaften des Größenmaßelementes durch Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit und zulässigen Formabweichung zusätzlich eingeschränkt werden. Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen werden im GPS-System mit einem Toleranzrahmen und weiteren Symbolen in der technischen Zeichnung gekennzeichnet.

### **5.3 Kennzeichnung der tolerierten Elemente, Toleranzzonen, Toleranzrahmen, Symbole und Bezüge**

#### **5.3.1 Toleranzrahmen und grundlegende Symbole**

In der DIN EN ISO 1101:2008 [1101] sind die Vorgaben zur Spezifikation und teilweise zur Assoziation von Form-, Richtungs-, Orts- und Laufabweichungen festgelegt. Der Toleranzrahmen ist das grundlegende Element für die Zeichnungseintragung. Dieser ist aus fünf Feldern zusammengesetzt (Bild 63) [1101]. Im ersten Feld wird die Toleranzart mit einem Symbol eingetragen. Im zweiten Feld wird die Weite der Toleranzzone festgelegt. Mit einem Durchmessersymbol oder einem zusätzlichen S (sphere) für

kugelförmige Toleranzzone kann diese Angabe bezüglich der Form der Toleranzzone erweitert werden.



*Bild 63: Toleranzrahmen mit der Beschreibung der fünf Felder*

In den Feldern drei bis fünf werden die Bezüge durch Großbuchstaben gekennzeichnet. Wie in Bild 63 dargestellt, ist festgelegt, dass im dritten Feld der primäre, im vierten der sekundäre und im fünften der tertiäre Bezug eingetragen wird. Die alphabetische Reihenfolge der Buchstaben ist nicht festgelegt. Ein gemeinsamer Bezug ist durch einen Bindestrich zwischen zwei Bezügen gekennzeichnet und kann in jedem Bezugsfeld des Toleranzrahmens stehen.

Die Symbole der geometrischen Eigenschaften, die mit diesem Toleranzrahmen spezifiziert werden können, enthält Tabelle 16.

*Tabelle 16: Überblick über die Symbole zur Tolerierung der geometrischen Eigenschaften in der Norm DIN EN ISO 1101 mit dem Abschnitt im Dokument [1101]*

Toleranzen	Merkmal	Symbol	Bezug erforderlich	Abschnitt
Form	Geradheit	—	nein	18.1
	Ebenheit		nein	18.2
	Rundheit	○	nein	18.3
	Zylindrizität		nein	18.4
	Profil einer beliebigen Linie	⌒	nein	18.5
	Profil einer beliebigen Fläche	⌒	nein	18.7
Richtung	Parallelität	//	ja	18.9
	Rechtwinkligkeit	⊥	ja	18.10
	Neigung	∠	ja	18.11
	Profil einer beliebigen Linie	⌒	ja	18.6
	Profil einer beliebigen Fläche	⌒	ja	18.8
Ort	Position	⊕	nein oder ja	18.12
	Konzentrizität (für Mittelpunkte)	⊙	ja	18.13
	Koaxialität (für Achsen)	⊙	ja	18.13
	Symmetrie	≡	ja	18.14
	Profil einer beliebigen Linie	⌒	ja	18.6
	Profil einer beliebigen Fläche	⌒	ja	18.8
Lauf	Rundlauf/Planlauf/kreisförmiger Lauf, radial, axial in beliebiger oder vorgegebener Richtung	↗	ja	18.15
	Gesamtlauf/Gesamtrundlauf/Gesamtplanlauf	↗↗	ja	18.16



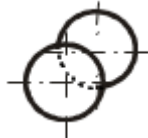


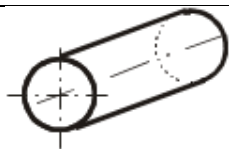
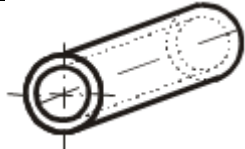


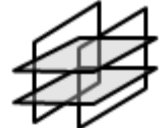
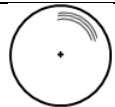
Die Weite der Toleranzzone entspricht der zulässigen Grenze. Liegt die reale Oberfläche innerhalb der Zone, entspricht das Bauteil der Spezifikation.

### 5.3.2 Arten von Toleranzzonen

Definiert sind die Zonen in DIN EN ISO 1101 [1101] als: „Raum, der durch eine oder mehrere geometrisch ideale Linien oder Flächen begrenzt und durch ein Längenmaß, Toleranz genannt, gekennzeichnet ist.“ In der folgenden Tabelle 17 sind die Toleranzzonen zusammengefasst.



Tabelle 17: Zonen und deren grafische Darstellung [nach 1101]

Zone	Grafische Darstellung
Fläche innerhalb eines Kreises	
Fläche zwischen zwei konzentrischen Kreisen	
Fläche zwischen zwei coaxialen Kreisen	
Fläche zwischen zwei abstandsgleichen Linien	
Fläche zwischen zwei parallelen geraden Linien	
Raum innerhalb eines Zylinders	
Raum zwischen zwei coaxialen Zylindern	
Raum zwischen zwei abstandsgleichen Flächen	
Raum zwischen zwei parallelen Ebenen	
Raum innerhalb eines Quaders oder Prismas	
Raum innerhalb einer Kugel	

In der Norm [1101] wird zusätzlich festgelegt, dass „das tolerierte Element innerhalb dieser Toleranzzone jede beliebige Form und jede beliebige Richtung haben darf, es sei denn, es wird eine einschränkende Angabe, z. B. als Wortangabe, gemacht.“ Zudem ist geregelt, dass die „Toleranz für den gesamten Bereich des tolerierten Elementes gilt“, außer es wird ausdrücklich anders festgelegt.

### 5.3.3 Theoretisch genauer Abstand (TED)

Der Ort eines Nicht-Größenmaßelementes wird mit einem theoretisch genauem Abstand oder Winkel (TED - theoretically exact dimension), ausgehend von einem Bezug, gekennzeichnet [1101]. Auf der technischen Zeichnung werden TEDs in einem eckigen Rahmen dargestellt und dürfen nicht toleriert werden. Es ist festgelegt, dass die Toleranzzone symmetrisch zum theoretisch genauen Abstand liegt, außer es ist eine ungleich verteilte Toleranzzone gesondert gekennzeichnet (siehe Tabelle 19). Alle Maße einer technischen Zeichnung, die keine Größenmaße sind, sind als TED zu kennzeichnen.

### 5.3.4 Kennzeichnung des tolerierten Elementes

Das tolerierte Element wird durch eine Hinweislinie vom Toleranzrahmen zum Bauteil gekennzeichnet [1101]. Soll eine Ebene oder Linie toleriert werden, dann endet die Hinweislinie auf der Kontur oder Maßhilfslinie (Bild 64). Zur Tolerierung eines zentralen Elementes ist die Hinweislinie des Toleranzrahmens fluchtend zur Maßlinie einzutragen oder mit dem Symbol A (im Kreis) (Tabelle 19) zu kennzeichnen (Bild 65). Das gleiche gilt für die Eintragung von Bezügen, die durch ein Rechteck mit einem Bezugsdreieck das Bezugselement kennzeichnen (siehe Tabelle 18) [5459].

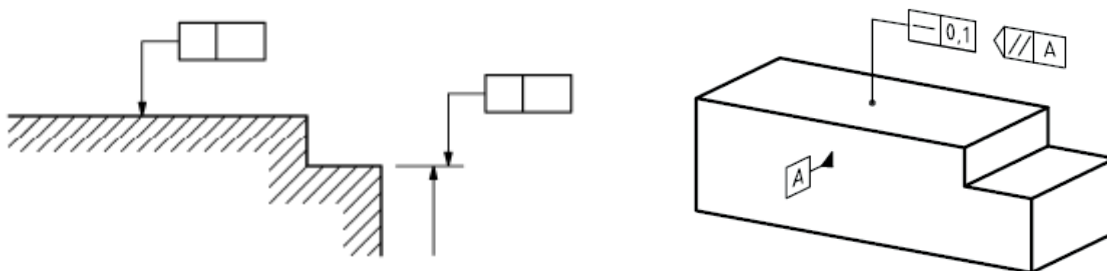
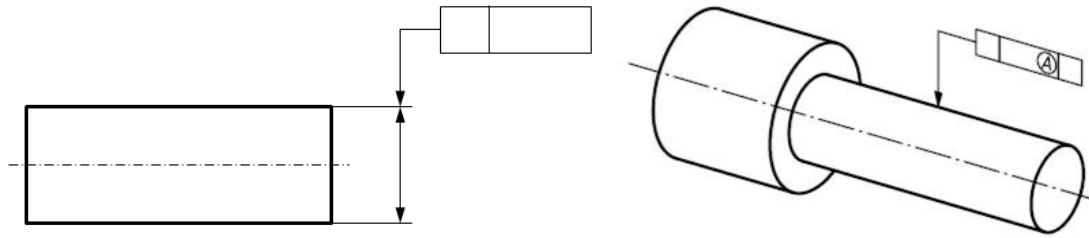
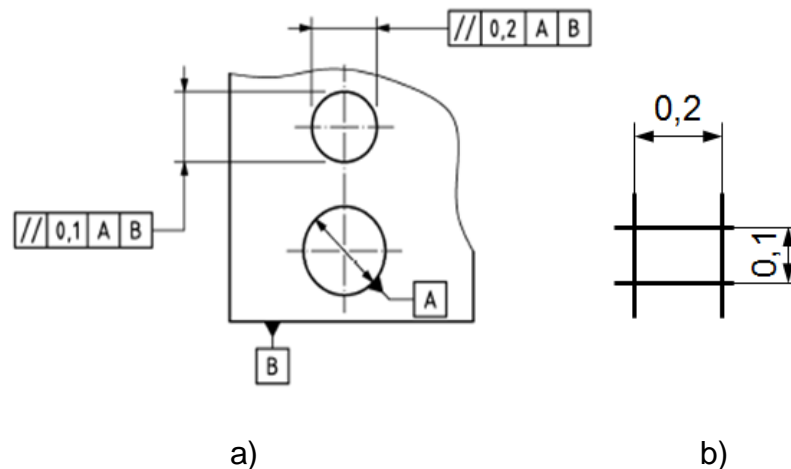


Bild 64: Kennzeichnung des tolerierten Elementes [1101, 1101(E)]



*Bild 65: Kennzeichnung der Tolerierung eines zentralen Elementes [1101, 1101(E)]*

Die Eintragung des Toleranzrahmens in der 2D-Ansicht beeinflusst die Lage der Toleranzzone [1101]. Die Weite der Toleranzzone gilt senkrecht zur spezifizierten Form des Geometrieelementes, auch wenn die Hinweislinie dies nicht ausdrückt. Für zentrale Elemente gilt, dass die Richtung der Weite der Toleranzzone in der Richtung der Hinweislinie liegt und bei zwei Toleranzzonen diese senkrecht zueinander stehen (Bild 66).



*Bild 66: Richtungsabhängigkeit der Toleranzzone: a) Zeichnungseintragung [1101], b) Toleranzzonen*

Soll die gleiche Weite der Toleranzzone für mehrere Geometrieelemente festgelegt werden, kann dies durch die Verbindung der Hinweislinien mit einem Toleranzrahmen erfolgen (siehe Bild 67a). Wird eine gemeinsame Toleranzzone festgelegt, dann wird der Toleranzwert um das Symbol CZ (common zone) ergänzt (Bild 67b). Diesen und weitere Modifikatoren enthält Tabelle 18.

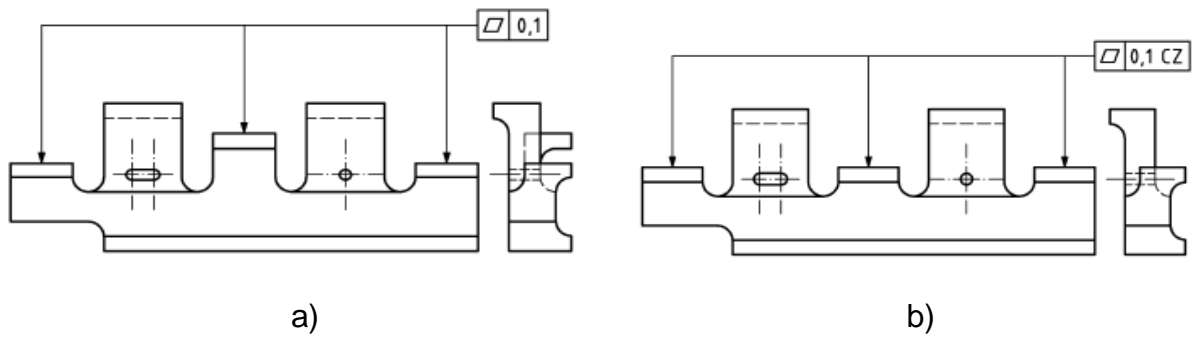
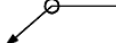






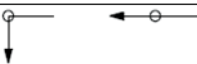



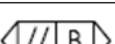
Bild 67: Für mehrere Geometrieelemente gilt: a) gleicher Wert b) gemeinsame Zone  
[1101]

Tabelle 18: Zusätzliche Symbole [1101]

Beschreibungen	Symbol	Referenz
Projizierte Toleranzzone	Ⓟ	Abschnitt 13 und ISO 10578
Maximum-Material-Bedingung	Ⓜ	Abschnitt 14 und ISO 2692
Minimum-Material-Bedingung	Ⓛ	Abschnitt 15 und ISO 2692
Freier-Zustand-Bedingung (nicht-formstabile Teile)	Ⓢ	Abschnitt 16 und ISO 10579
Rundum (Profil)		Abschnitt 10.1
Hüllbedingung	ⓔ	ISO 8015
Gemeinsame Zone	CZ	Abschnitt 8.5
Innendurchmesser	LD	Abschnitt 10.2
Außendurchmesser	MD	Abschnitt 10.2
Flankendurchmesser	PD	Abschnitt 10.2
Linielement	LE	Abschnitt 18.9.4
nicht konvex	NC	Abschnitt 6.3
jeder beliebige Querschnitt	ACS	Abschnitt 18.13.1

Die Symbole (vgl. Tabelle 19) für Richtungs- und Sammlungselement sowie Schnitt- und Orientierungsebene wurden zur eindeutigen Tolerierung am 3D-Modell neu entwickelt [1101(E)]. Damit können z. B. projektionsabhängige Ausrichtungen der Toleranzzonen festgelegt werden, die in 2D durch die Eintragung in der entsprechenden Ansicht erfolgen [1101, 1101(E), Grö11].

*Tabelle 19: Neue Symbole in E DIN EN ISO 1101:2012 [1101(E)]*

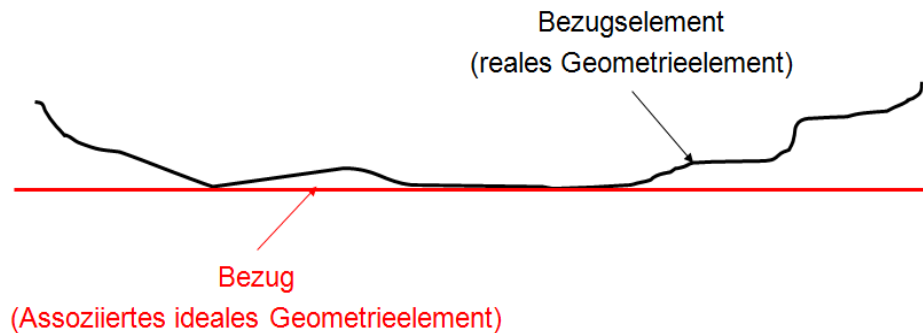
Beschreibungen	Symbol
Mittleres Geometrieelement	
ungleich verteilte Toleranz	
zwischen	
von ... nach	
rundherum	
Richtungselement	
Sammlungselement	
Schnittebene	
Orientierungsebene	

### 5.3.5 Bezüge

Im GPS-System sind die Regeln zur Bezugsbildung in der DIN EN ISO 5459 aus dem Jahr 2011 [5459] definiert. Sie sind idealgeometrische Elemente, die den Ort und die Richtung von Toleranzzonen oder virtuellen Bedingungen durch die Bindung von Invarianzgraden in einem Koordinatensystem festlegen. Das Ziel der Bezugsbildung ist die Bindung aller sechs Invarianzgrade (Bild 20).

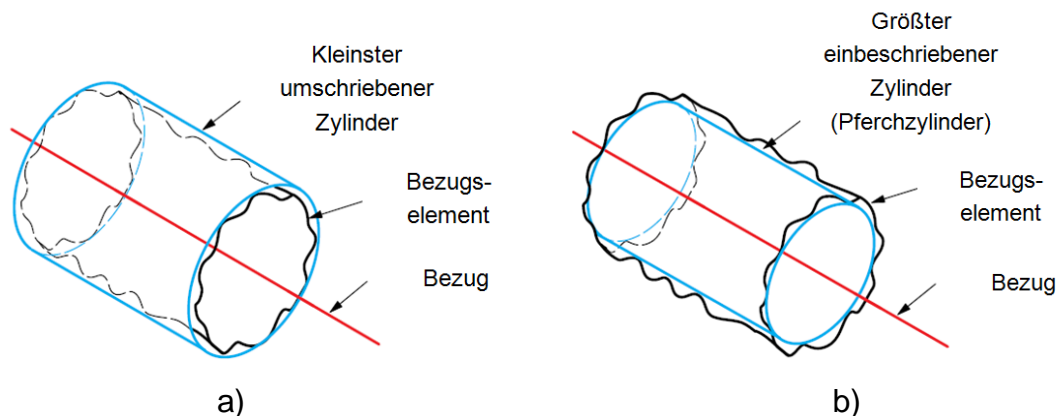
Am realen Geometrieelement, das als Bezugselement bezeichnet wird, wird durch Assoziation ein idealgeometrisches Element oder abgeleitetes Element gebildet, das

den Bezug darstellt (Bild 68). Als Bezug wird im Rahmen dieser Arbeit ein Einzelbezug entsprechend der Definition in der DIN EN ISO 5459 [5459] verstanden.



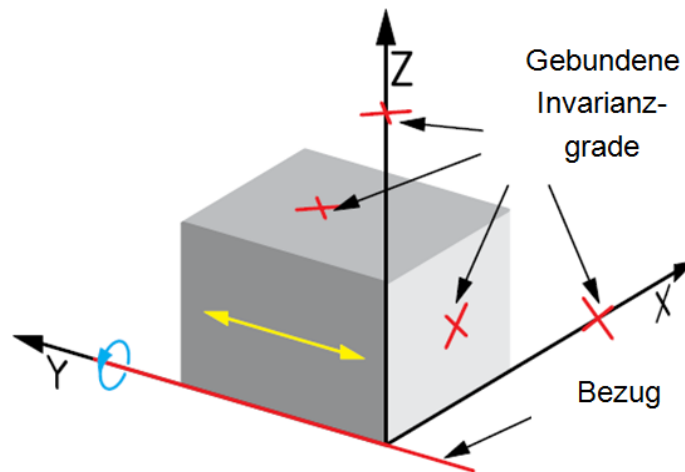
*Bild 68: Bezug durch Zuordnung aus dem Bezugselement abgeleitet [nach Nie12]*

Ein Bezug kann ein Punkt, eine Gerade, eine Ebene, jeweils auch als zentrales Geometrieelement, sein. Die Assoziationskriterien für die Bildung der Bezüge sind in der Norm DIN EN ISO 5459 [5459] festgelegt. Ein Bezug kann auch durch eine oder mehrere Bezugsstellen definiert werden. Beispielhaft ist die Bildung einer zentralen Linie eines Zylinders als Bezug durch unterschiedliche Assoziationskriterien im Bild 69 dargestellt.



*Bild 69: Zentrale Linien als Bezug, aus a) Hüllzylinder und b) Pferchzylinder berechnet [nach Nie12]*

Entsprechend des assoziierten Geometrieelementes werden mehr oder weniger Invarianzgrade gebunden. Durch die zentrale Linie eines Zylinders als Bezug werden zwei translatorische Invarianzgrade rechtwinklig zu der zentralen Linie und die zwei möglichen rotatorischen Invarianzgrade gebunden (Bild 70).



*Bild 70: Freiheitsgrade, gebunden durch die zentrale Linie eines Zylinders [Nie12]*

Soll der Bezug aus mehr als einem Geometrieelement gebildet werden, kann ein gemeinsamer Bezug definiert werden. Dabei wird ein Bezug aus mehreren Geometrieelementen gebildet. Der gemeinsame Bezug ist in Tabelle 20 dem Bezugssystem gegenübergestellt. Bei diesem stehen mehrere Einzelbezüge in Verbindung, die zusammen das Koordinatensystem für die Toleranzzonen und das Bauteil darstellen [Nie12, 5459].

Mit einem Drei-Ebenen-Bezugssystem (Bild 71) werden z. B. alle sechs Invarianzgrade eines Bauteiles gebunden. Alle drei Ebenen stehen definitionsgemäß rechtwinklig zueinander. Die Reihenfolge der zur Bezugsbildung ausgewählten Geometrieelemente hat deshalb Einfluss auf die Lage des Bezugssystems am wirklichen Bauteil, da Formabweichungen am wirklichen Geometrieelement die Assoziation des idealen Geometrieelementes beeinflussen. Das hat dazu geführt, dass ein primärer, sekundärer und tertiärer Bezug und Nebenbedingungen bezüglich der Richtung und des Ortes definiert wurden [5459].

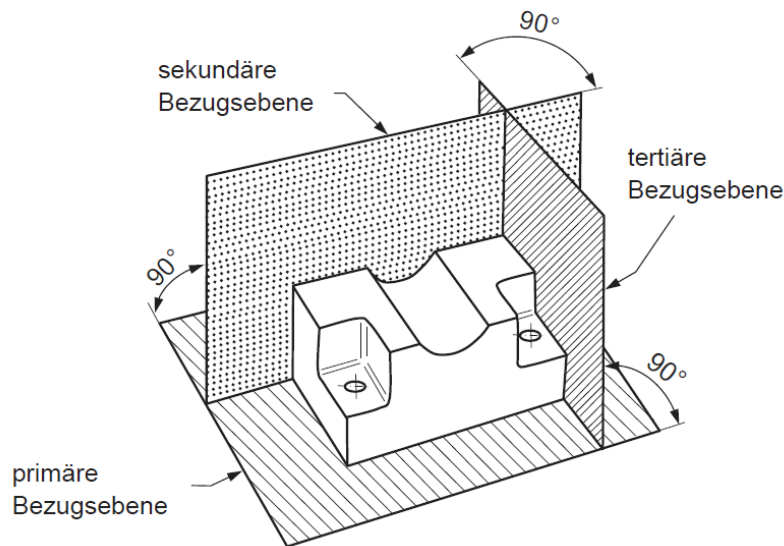
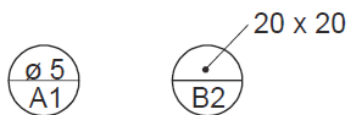


Bild 71: Drei-Ebenen-Bezugssystem [5459]

Der primäre Bezug ist der erste Bezug des Bezugssystems und wird nicht durch Nebenbedingungen beeinflusst. Der sekundäre Bezug wird durch das zweite Geometrieelement gebildet und durch eine Nebenbedingung der Richtung, hervorgerufen durch den primären Bezug, beeinflusst. Die Nebenbedingung der Richtung ist eine Einschränkung bezüglich der rotatorischen Freiheitsgrade. Der tertiäre Bezug wird durch Nebenbedingungen, hervorgerufen durch den primären und sekundären Bezug, beeinflusst.

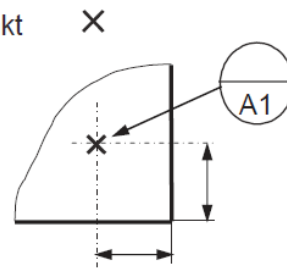
Bezugsstellenrahmen



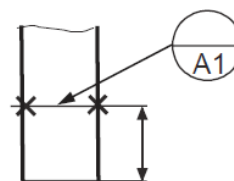
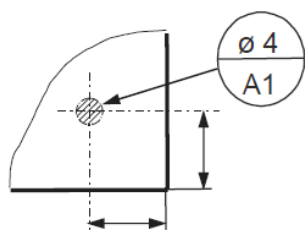
Bezugsfläche



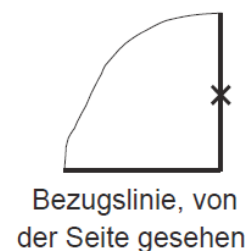
Bezugspunkt



Bezugslinie



Bezugslinie,  
von vorn gesehen



Bezugslinie,  
von der Seite gesehen

Bild 72: Bezugsstellen [5459]



Bezugsstellen werden verwendet, wenn nicht das gesamte Geometrieelement für die Bildung des Bezugs genutzt werden kann oder soll [5459]. Bild 72 zeigt die Hilfsmittel für die Anwendung von Bezugsstellen.

Tabelle 20: Gegenüberstellung Bezugssystem und gemeinsamer Bezug [5459]

Kennzeichnung des Bezugselements	Kennzeichnung des Bezugs im Toleranzrahmen	Bedeutung am Werkstück	Resultierender gemeinsamer Bezug oder resultierendes Bezugssystem
<b>Legende</b> 1 erstes zugeordnetes (Geometrie) Element ohne Nebenbedingung der Richtung 2 zweites zugeordnetes (Geometrie) Element mit Nebenbedingung der Richtung bezüglich des ersten zugeordneten (Geometrie) Elements 3 gleichzeitig zugeordnete (Geometrie) Elemente mit Nebenbedingung der Richtung und Nebenbedingung der Lage 4 größter Abstand zwischen den zugeordneten (Geometrie) Elementen und den Bezugselementen 5 Gerade, die das Situationselement des zugeordneten Zylinders (seiner Achse) ist 6 Schnittpunkt zwischen der Geraden und der Ebene			
ANMERKUNG 1 Die Richtung und Lage von Bezügen sind unterschiedlich, abhängig von der Eintragung der Bezüge im Toleranzrahmen. ANMERKUNG 2 Die Zuordnung für Bezugssysteme ist in A.2.4 beschrieben.			

Tabelle 20 stellt dar, welche Konsequenzen sich ergeben, wenn der primäre und der sekundäre Bezug getauscht werden. Diese Festlegung erfolgt durch die Eintragung der Bezüge (Großbuchstaben) an der entsprechenden Position im Toleranzrahmen.

In der Norm DIN EN ISO 5459 [5459] sind weitere umfangreiche Ausführungen zu den Bezügen in Form von Regeln dargestellt und durch Beispiele erläutert, die hier aufgrund des begrenzten Rahmens nicht aufgeführt werden.

Mit der Definition von Zonen und Bezügen sowie den Festlegungen zu Symbolen und der Zeichnungseintragung können die geometrischen Eigenschaften eines Bauteils bezüglich Form-, Orts-, Richtungs- und Laufabweichungen spezifiziert werden. Neben den Normen DIN EN ISO 1101 [1101] DIN EN ISO 5458 [5458], DIN EN ISO 5459 [5459] haben mehrere Autoren die Tolerierung der Form, Orts-, Richtungs- und Lauftoleranzen mit dem GPS-System ausführlich beschrieben [Hen11, Jor11, Sch11, Wec01, Tru97, Nie12, Cha12, Kle12]. Deshalb wird in den folgenden Ausführungen die Spezifikation der einzelnen Gestaltabweichungen nur im Überblick vorgestellt.

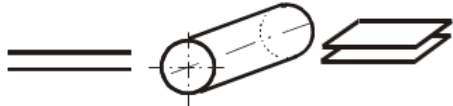




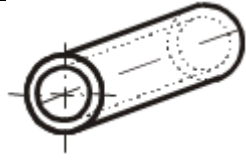


## **5.4 Form**

Formtoleranzen begrenzen die Formabweichungen eines Geometrieelementes gegenüber seiner idealen Gestalt. Formtoleranzen haben keinen Bezug. Damit sind der Ort und die Richtung der Toleranzzone im Raum nicht festgelegt. Zu den Formtoleranzen gehören die in der Tabelle 21 aufgelisteten Toleranzarten. Mit der Formtoleranz wird definitionsgemäß auch die Welligkeit eines Bauteils mit begrenzt, obwohl auch bei der Tolerierung der Oberflächenbeschaffenheit (siehe Kapitel 5.8) Kenngrößen zur Einschränkung der Welligkeit definiert sind.

Ausnahmeregeln bei der Festlegung der Richtung der Toleranzzone ergeben sich bei den Geradheits- und die Rundheitstoleranzen. Es ist festgelegt [1101], dass bei der Geradheit die Toleranzzone parallel zur Zeichnungsebene gilt. Bei der Rundheitstoleranz ist die Weite der Toleranzzone rechtwinklig zur zentralen Linie des Zylinders definiert.

Je nach Geometrieelement und Toleranzart ist die Toleranzzone festgelegt. In Tabelle 21 erfolgte eine Zusammenstellung der anwendbaren Toleranzzonen für jede Toleranzart und die Geometrieelemente, für die diese Toleranzart anwendbar ist.

*Tabelle 21: Übersicht über Formtoleranzen mit Toleranzzonen*

Toleranzart	Symbol	Toleranzzonen	Anwendung für
Geradheit	—		Gerade, Ebene, Zylinder (Mantellinie, zentrale Linie)
Ebenheit			Ebene
Rundheit	○		Kreis, Zylinder, Kegel
Zylindrizität			Zylinder
Profil einer beliebigen Linie	⌒		Kante, Radius, Kugelausschnitt, Freiformfläche
Profil einer beliebigen Fläche	⌒		Kante, Radius, Halbkugel, Freiformfläche

Am Beispiel des im Bild 6 gezeigten Radius wird die Formtolerierung erläutert. Der Radius von 7,5 mm ist im Bild 73 als TED eingetragen. Die Toleranzzone wird gebildet aus zwei abstandsgleichen Flächen (hier im Schnitt dargestellt). Der Abstand von 2 mm ergibt sich aus dem imaginären Abrollen einer Kugel mit dem Durchmesser von 2 mm auf der Nenngeometrie. Die Toleranz ist eingehalten, wenn alle Oberflächenbestandteile innerhalb der Toleranzzone liegen.

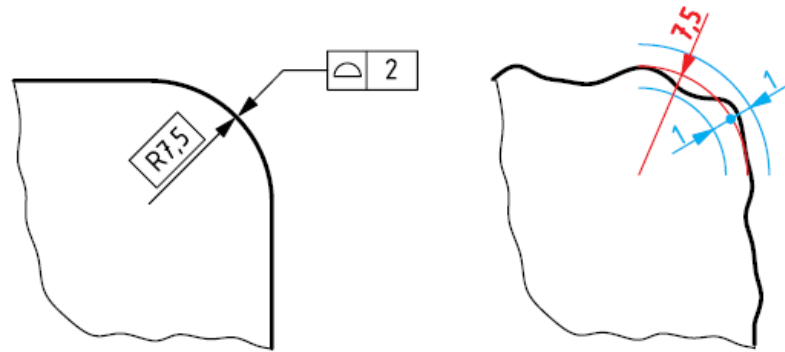


Bild 73: Radiustolerierung mit Profil einer beliebigen Fläche [Nie12]

In diesem Beispiel ist der Ort des Mittelpunktes gegenüber den Kanten nicht festgelegt. Damit ist die Tolerierung nicht eindeutig. Im Abschnitt 5.5.2 wird mit der Festlegung von Bezügen der Ort der Toleranzzone eindeutig beschrieben.

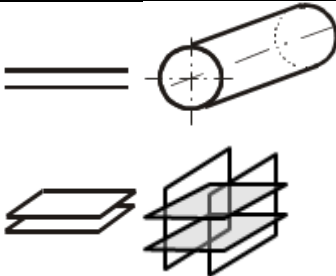
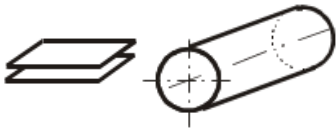

## 5.5 Richtung, Ort und Lauf

### 5.5.1 Richtungstoleranzen

Richtungstoleranzen eines Geometrieelementes begrenzen dessen Richtungs- und Formabweichungen. Der Ort der Toleranzzone ist nicht festgelegt. Innerhalb der Richtungstoleranz kann die Form des Geometrieelementes beliebig sein. Richtungstoleranzen erfordern die Festlegung eines Bezuges.

Zu den Richtungstoleranzen gehören die in der Tabelle 22 aufgelisteten Toleranzarten. Bei der Anwendung der Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz ist zu beachten, dass die Toleranzzone die Richtung des Geometrieelementes im Raum begrenzt, aber nur in den Freiheitsgraden, die durch die Toleranzzone gebunden werden [Die12]. Zur eindeutigen Spezifikation sind alle Freiheitsgrade des tolerierten Geometrieelementes zu binden.

Tabelle 22: Übersicht über Richtungstoleranzen und zugehörigen Toleranzzonen

Toleranzart	Symbol	Toleranzzonen	Anwendung für
Parallelität	//		Ebene, Zylinder (Mantellinie, zentrale Linie)
Rechtwinkligkeit	⊥		Ebene (zentrale Linie), Zylinder (zentrale Linie)
Neigung	∠		Ebene (zentrale Linie), Zylinder (zentrale Linie)

Bei der Tolerierung der Parallelität im Bild 74 wird verdeutlicht, dass die Toleranzzone parallel zum Bezug liegt. Bei der Neigungstolerierung wird der Winkel mit einem TED angegeben.

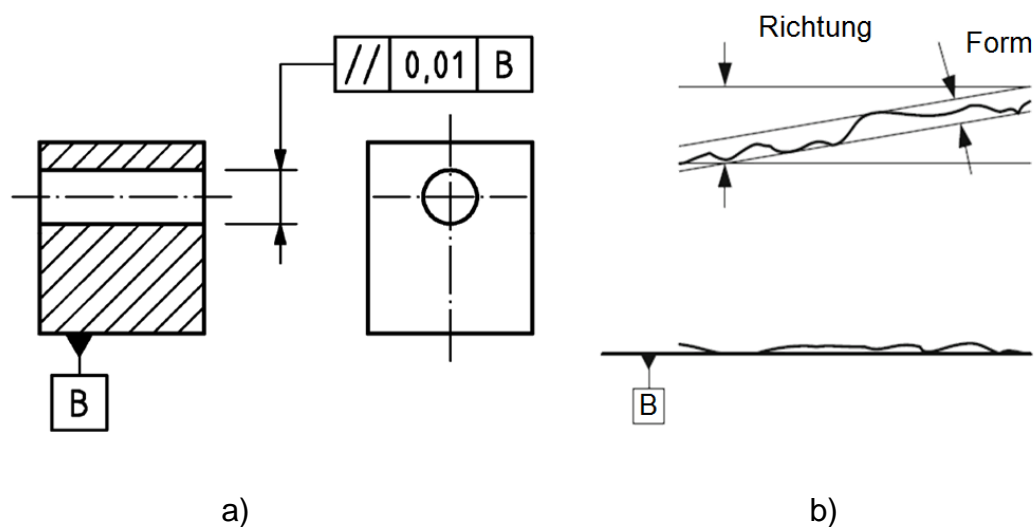


Bild 74: Begrenzung der Formabweichung mit der Richtungstoleranz am Beispiel der Parallelität einer zentralen Linie zu einer Fläche: a) Spezifikation [1101], b) Darstellung der Toleranzzone [Zha11]

Weitere Beispiele für die Anwendung der Richtungstolerierung enthalten die o. g. Literaturquellen.

### 5.5.2 Ort

Ortstoleranzen eines Elementes begrenzen die Orts-, Richtungs- und Formabweichung. Zu den Ortstoleranzen gehören die Positions-, Konzentritäts-, Koaxialitäts- und Symmetrietoleranzen sowie das Profil einer Linie und das Profil einer Fläche, wenn diese mit Bezug angegeben werden. Die Tolerierung ist in der DIN EN ISO 1101 [1101] festgelegt. Weitere Ausführungen zu den Positionstoleranzen enthält die DIN EN ISO 5458 [5458]. In der Tabelle 23 sind den Ortstoleranzen die möglichen Toleranzzonen und Geometrielemente, für die die Toleranzart angewendet werden kann, zugeordnet.

Am Beispiel einer Flächenformtolerierung wird im Bild 75 die Begrenzung der Form- und Richtungsabweichung durch die Ortstoleranz verdeutlicht.

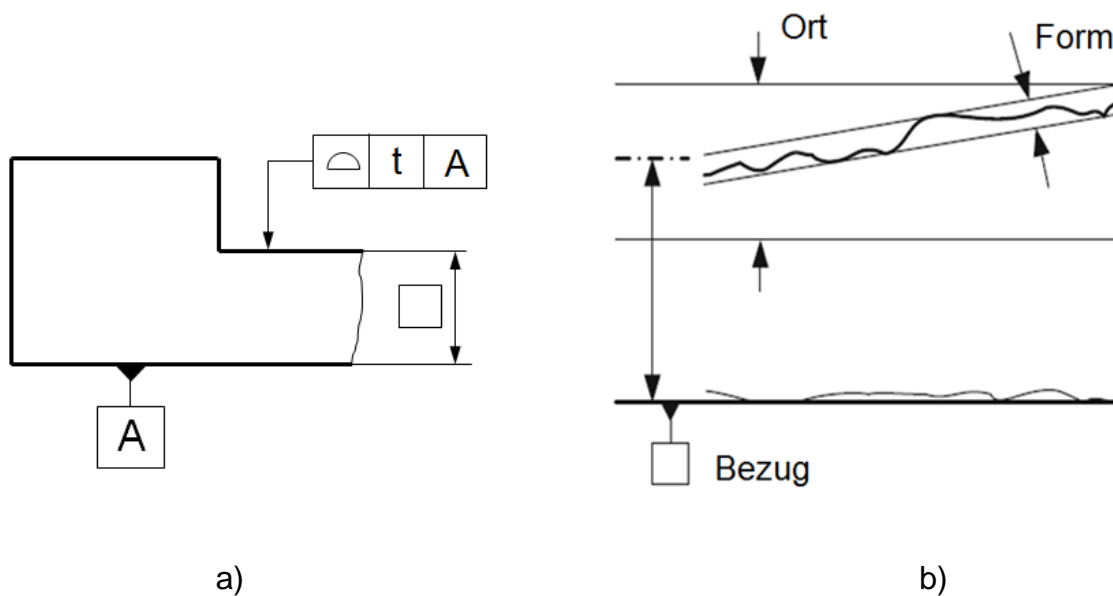
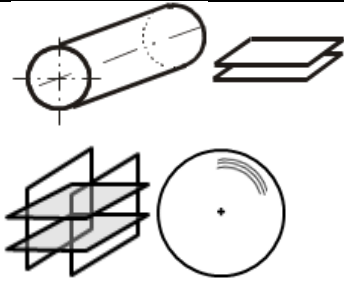

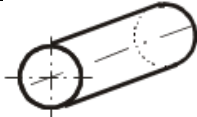
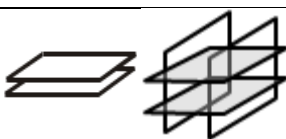




Bild 75: Begrenzung der Form- und Richtungsabweichung durch die Ortstolerierung: a) Spezifikation, b) Interpretation [Zha11]

Tabelle 23: Übersicht über Ortstoleranzen

Toleranzart	Symbol	Toleranzzonen	Anwendung für
Position	$\oplus$		Ebene (zentrale Linie), Zylinder (zentrale Linie), Kugel (zentraler Punkt)
Konzentrität	$\odot$		Zylinder (zentraler Punkt)
Koaxialität	$\odot$		Zylinder (zentrale Linie)
Symmetrie	$\equiv$		Ebene (zentrale Linie)
Profil einer beliebigen Linie mit Bezug	$\frown$		Kante, Radius, Halbkugel, Freiformfläche
Profil einer beliebigen Fläche mit Bezug	$\smile$		Kante, Radius, Halbkugel, Freiformfläche

Abstände, Radien und Kanten können mit Ortstoleranzen eindeutig toleriert werden. Bild 76 greift die Spezifikation des Radius (Bild 6 und Bild 73) wieder auf und zeigt, dass mit der Festlegung von Bezügen der Ort des Radiusmittelpunktes eindeutig zu den Kanten festgelegt werden kann.

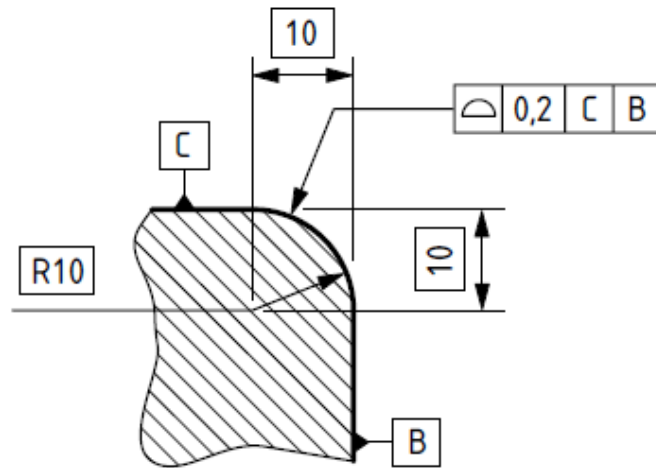


Bild 76: Radiustolerierung mit Bezugssystem [Nie12]

Der Ort von Größenmaßelementen kann mit der Positionstolerierung begrenzt werden. Im Bild 77 ist der Ort der Toleranzzone zur Fläche mit dem Bezug A begrenzt. Mit den Regeln für die Bezugsbildung wird die Formabweichung an der Fläche durch das anliegende Element ausgeglichen. Weitere Einschränkungen sind nötig, um alle Freiheitsgrade der Position der zentralen Linie der Bohrung zu binden.

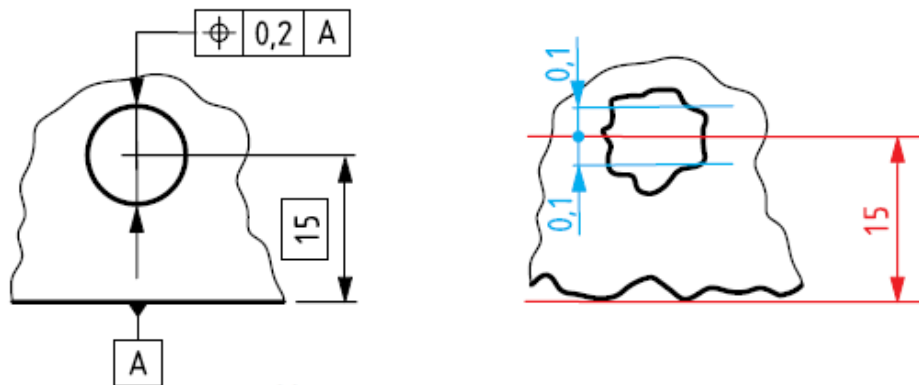


Bild 77: Positionstolerierung eines abgeleiteten Geometrieelementes zu einer Fläche [Nie12]




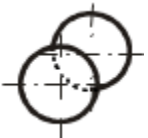



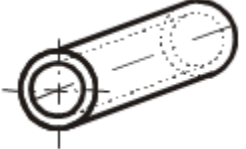


Koaxialität und Konzentrizität werden mit dem gleichen Symbol gekennzeichnet. Deshalb muss bei der Konzentrizität der Hinweis ACS (any cross section) als jeder beliebige Querschnitt über dem Toleranzrahmen ergänzt werden. Koaxialitäts- und Konzentrizitätsabweichungen werden auch durch Lauftoleranzen eingeschränkt.



### 5.5.3 Lauf

Lauftoleranzen sind in der DIN EN ISO 1101 [1101] definiert und werden für rotationssymmetrische Bauteile angewendet. Tabelle 24 gibt einen Überblick über die Lauftoleranzen, die damit verbundenen Toleranzzonen und das Anwendungsspektrum. Der Rundlauf wird für einen Querschnitt des Zylinders an jeder Stelle definiert und beinhaltet die Konzentrititäts- und Rundheitsabweichungen eines Zylinders, wobei die Größe der anderen Abweichungen nicht von der Rundlaufabweichung direkt abgeleitet werden können. Planlauf und Gesamtplanlauf beziehen sich auf die Stirnfläche. Die Toleranzzone steht rechtwinklig zur zentralen Linie als Bezug.

*Tabelle 24: Lauftoleranzen, Toleranzzonen und Anwendungsspektrum*

Toleranzart	Symbol	Toleranzzonen	Anwendung für
Rundlauf			Zylinder
Planlauf			Ebene
Lauf in vorgegebener Richtung			Zylinder
Gesamtrundlauf			Zylinder
Gesamtplanlauf			Ebene

Mit den bisher beschriebenen Spezifikationsmöglichkeiten für Größenmaße, Form-, Richtungs-, Orts- und Laufabweichungen können die Invarianzgrade jedes einzelnen Geometrieelementes eingeschränkt werden.

Zur Vereinfachung der Zeichnungseintragung wurden Allgemeintoleranzen entwickelt, die sowohl Größenmaß-, als auch Form-, Orts-, Richtungs- und Laufabweichungen eines Bauteils mit einer einzigen Angabe auf der technischen Zeichnung festlegen.

## **5.6 Allgemeintoleranzen**

Das Ziel der Entwicklung von Allgemeintoleranzen waren vollständig tolerierte Bauteile, wobei nicht jedes einzelne Geometrieelement einzeln toleriert wird, sondern durch Klassen. Die Toleranzen für die verschiedenen geometrischen Eigenschaften werden allgemein festgelegt. Allgemeintoleranzen sind in der Norm DIN EN ISO 2768 Teil 1 [2768-1] für Längen- und Winkelmaße und im Teil 2 [2768-2] für Form und Lage (Richtung, Ort und Lauf) für spanend bearbeitete Bauteile definiert. Für Schweißteile sind die Allgemeintoleranzen in der DIN EN ISO 13920 [13920] festgelegt.

Mit dem Hinweis ISO 2768 und der Angabe der Toleranzklasse neben oder im Schriftfeld gelten diese Toleranzen für alle Größenmaße, Abstände und Form-, Richtungs-, Orts- und Laufabweichungen, die nicht weiter in der Zeichnung toleriert sind.

Ausführlich sind diese und weitere Normen, das Ziel der Allgemeintoleranzen und deren Konsequenzen in [Hen11, Nie12] beschrieben. An dieser Stelle soll hauptsächlich darauf hingewiesen werden, dass nichttolerierte geometrische Eigenschaften damit entsprechend werkstattüblicher Genauigkeit toleriert werden können, aber die Fertigung und Prüfung die versteckten Angaben explizit nachsehen müssen. Speziell bringen Angaben zu Allgemeintoleranzen auch Probleme bei der Ableitung automatisierter Fertigungs- und Prüfpläne. Empfohlen wird deshalb, funktionsrelevante Eigenschaften eindeutig ohne Allgemeintoleranzen zu spezifizieren. Für Nicht-Größenmaßelemente führen die Allgemeintoleranzen aufgrund der Plus-Minus-Angaben zu den aufgezeigten Mehrdeutigkeiten. Nur für Größenmaßelemente ohne zusätzliche Einschränkungen ist die Anwendung der Allgemeintoleranzen zu empfehlen, da mit diesen keine Abhängigkeiten zwischen den geometrischen Eigenschaften eingeschränkt werden können.

## 5.7 Tolerierung von Abhängigkeiten der geometrischen Eigenschaften

### 5.7.1 Zusammenhang

Standardmäßig gilt im GPS-System das Unabhängigkeitsprinzip (siehe Kapitel 3.3). Im funktionalen Zusammenwirken mehrerer Bauteile stellt es nicht immer die funktionsgerechte Spezifikation dar. Deshalb wurden weitere Möglichkeiten definiert, die z. B. das Paaren von Bohrungen und Wellen oder Stiften eindeutig beschreiben. Es werden im Folgenden die Hüllbedingung und die Maximum-/Minimum-Material-Bedingungen erläutert, die Abhängigkeiten zwischen den Dimensionen eines Geometrieelementes und dessen Form-, Orts- und Richtungseigenschaften darstellen.

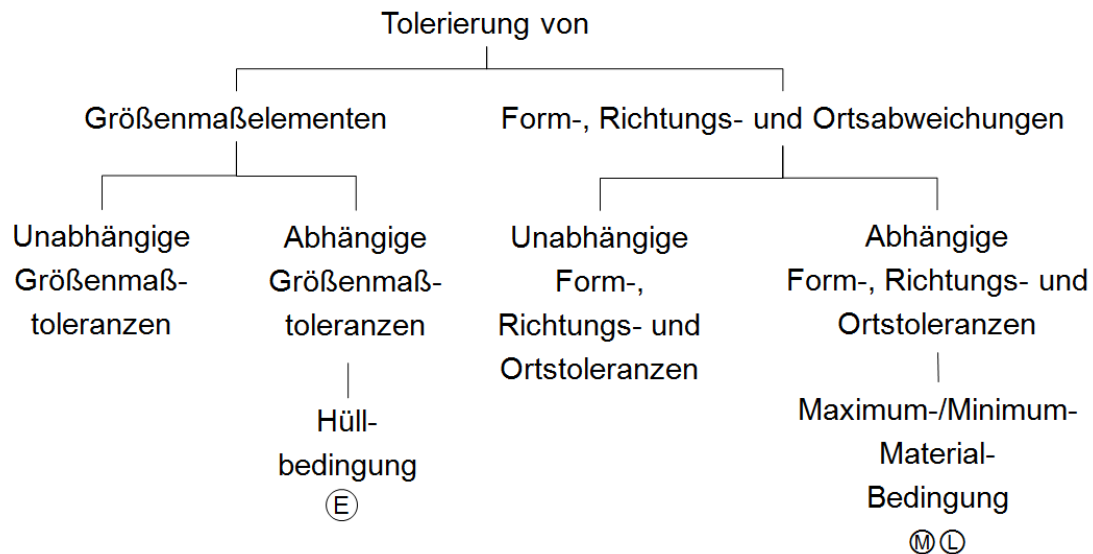


Bild 78: Abhängige Tolerierungsmöglichkeiten

Bild 78 stellt dar, dass die Hüllbedingung als abhängige Größenmaßtolerierung und Maximum- und Minimum-Material-Bedingungen als abhängige Form-, Richtungs- und Ortstoleranzen gekennzeichnet werden und entsprechend an der Größenmaßtoleranz oder im Toleranzrahmen eingetragen werden.

### 5.7.2 Hüllbedingung

Die Hüllbedingung stellt sicher, dass Wellen und Bohrungen miteinander gepaart werden können. Mit der Eintragung des Symbols ⓔ hinter dem Größenmaß gilt für das Größenmaßelement ein Zusammenhang zwischen dem Größenmaß und der Form des

Größenmaßelementes. Die Hüllbedingung und die Eintragung ist in der DIN EN ISO 14405-1 [14405-1] definiert als: „gleichzeitige Verwendung einer Kombination aus dem Zweipunktmaß als Spezifikationsoperator, angewendet auf die Minimummaterialbedingung der Maßtoleranz, und entweder dem kleinsten umschriebenen Maß oder dem größten einbeschriebenen Maß als Spezifikationsoperator, angewendet auf die Maximummaterialbedingung der Maßtoleranz.“

Tabelle 25: Gegenüberstellung der Hüllbedingung für Innen- und Außenzylinder

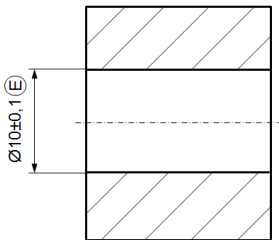
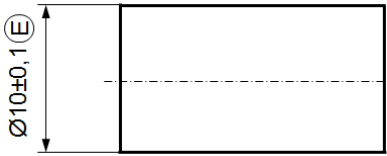
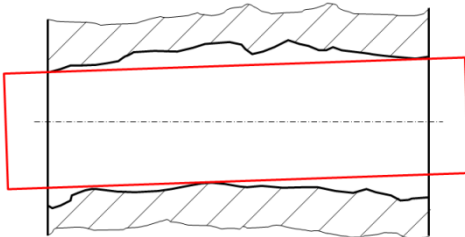
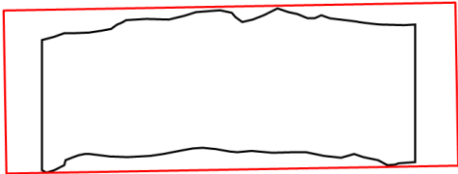
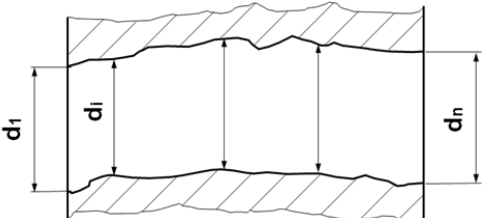
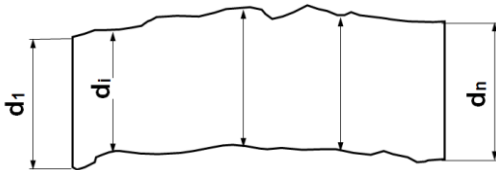
	Innenzylinder	Außenzylinder
<b>Tolerierung</b>		
<b>Maximum-material-maß</b>		
	Größter einbeschriebener Zylinder mit einem Durchmesser 9,9 mm darf nicht unterschritten werden	Kleinsten umschriebener Zylinder mit einem Durchmesser 10,1 mm darf nicht überschritten werden
<b>Minimum-material-maß</b>		
	Zweipunktmaß d von 10,1 mm darf nicht überschritten werden	Zweipunktmaß d von 9,9 mm darf nicht unterschritten werden

Tabelle 25 stellt die Tolerierung der Hüllbedingung mit den entsprechenden Größenmaßmerkmalen und Toleranzgrenzen gegenüber. Die Definition entspricht dem Taylorschen Grundsatz [1938]. Das Minimummaterialmaß bezeichnet die Toleranzgrenze, bei der das Größenmaßelement am wenigsten Material einnimmt. Bei einem Innenzylinder entspricht das dem größten zulässigen Leervolumen und bei einem Außenzylinder dem kleinsten zulässigen Zylinder, entsprechend der vorgegebenen Toleranz. Das Maximummaterialmaß kennzeichnet die zweite Toleranzgrenze entsprechend der maximalen Ausdehnung.

Die Eintragung der Hüllbedingung mit dem Symbol  $\textcircled{E}$  erfolgt, wie in Tabelle 25 gezeigt, entweder direkt hinter der Größenmaßtoleranz oder für die gesamte Zeichnung mit dem Hinweis „Maße nach ISO 14405  $\textcircled{E}$ “ in der Nähe des Schriftfeldes der Zeichnung.

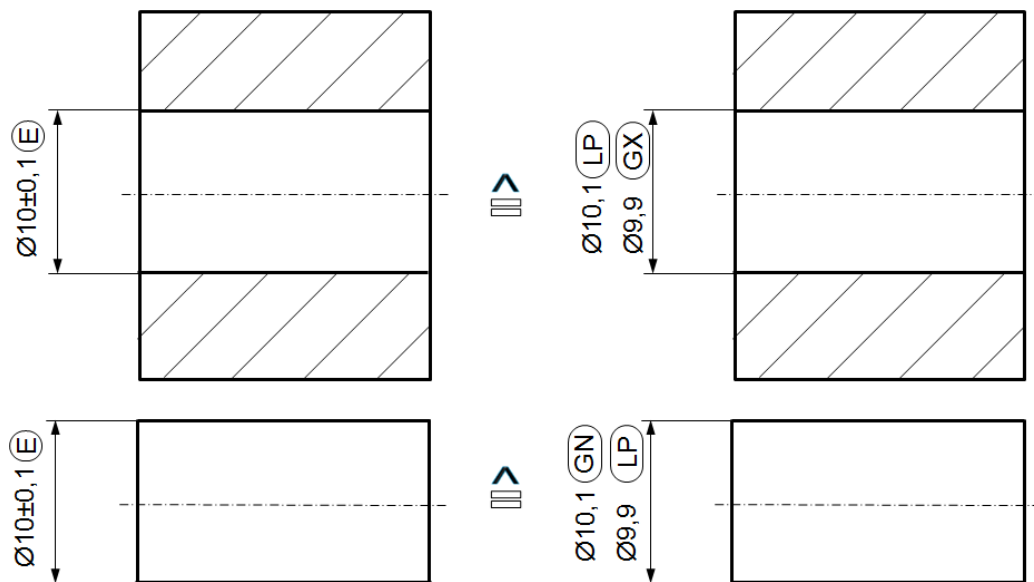


Bild 79: Ersatz des Symbols  $\textcircled{E}$  für die Hüllbedingung

Die Bedeutung von  $\textcircled{E}$  kann gleichbedeutend mit der Eintragung des Zweipunktmaßes und dem größten einbeschriebenen oder kleinsten umschriebenen Maß (Bild 79) für ein Größenmaßelement ersetzt werden. Auch bei der Maximum-/Minimum-Material-Bedingung wird eine Abhängigkeit zwischen den Größenmaßtoleranzen und den Form-, Orts- und Richtungstoleranzen erzeugt.

### 5.7.3 Maximum-/Minimum-Material-Bedingungen

Maximum-Material-Bedingung (MMR), Minimum-Material-Bedingung (LMR) und Reziprozitätsbedingung (RPR) sind in der DIN EN ISO 2692 [2692] definiert. Die MMR beschreibt die Kombination zweier unabhängiger Toleranzanforderungen in einer gemeinsamen Anforderung für die Paarungsfunktion [2692]. Diese Bedingung darf nur angewendet werden, wenn es sich um reines Fügen handelt. Bei kinematischen Ketten und für Geometrieelemente, die Kräfte übertragen müssen, darf diese Bedingung nicht angewendet werden.

Wird für ein Bauteil eine Mindestwandstärke gefordert, dann kann die Minimum-Material-Bedingung eingesetzt werden. Zusätzlich zu MMR und LMR kann auch die RPR angewendet werden, womit die Maßtoleranz überschritten werden darf.

Ziel der Maximum-Material-Bedingung ist die Erweiterung der Form-, Richtungs- oder Ortstoleranz bei Nichtausnutzung der Maßtoleranz am wirklichen Größenmaßelement, ohne die Paarung mit dem Gegenstück zu beeinflussen. Soll diese Regel gelten, dann wird hinter der Weite der Toleranzzone im Toleranzrahmen das Symbol  $\textcircled{M}$  eingetragen. Die Anwendung ist begrenzt auf die Verbindung des Maßes eines Größenmaßelementes zur Form-, Richtungs- oder Ortstoleranz des abgeleiteten Geometrieelementes dieses Größenmaßelementes. Die Maximum-Material-Bedingung kann für tolerierte Elemente oder Bezüge angewendet werden. Für den Bezug wird das Symbol  $\textcircled{M}$  hinter dem Bezugsbuchstaben im Toleranzrahmen eingetragen.

Die Minimum-Material-Bedingung wird eingesetzt, wenn eine Mindestwandstärke gefordert ist oder sichergestellt werden soll, dass für eine Weiterbearbeitung des Bauteils ausreichend Material am Bauteil, z. B. nach dem Gießen, verfügbar ist. LMR bezieht sich auf das Maß eines Größenmaßelementes und auf die Form des Größenmaßelementes sowie den Ort seines abgeleiteten Geometrieelementes. Die Eintragung der Minimum-Material-Bedingung erfolgt mit dem Symbol  $\textcircled{L}$  entweder hinter dem tolerierten Element oder am Bezugsbuchstaben im Toleranzrahmen.

Die Reziprozitätsbedingung ist nur für das tolerierte Element anwendbar und nutzt die Toleranzgrenzen noch weiter aus. Eingetragen wird diese Bedingung mit dem Symbol R (im Kreis) hinter dem Symbol  $\textcircled{M}$  oder  $\textcircled{L}$ .

Für das Verständnis der Wirkung der Maximum-Material-Bedingung, Minimum-Material-Bedingung und Reziprozitätsbedingung sind in der DIN EN ISO 2696 [2692] weitere Begriffe und Regeln festgelegt, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt werden sollen.

Zur vollständigen Spezifikation geometrischer Eigenschaften werden abschließend die Festlegungen zur Spezifikation der Oberflächenbeschaffenheit aufgezeigt.

## **5.8 Oberflächenbeschaffenheit**

### *5.8.1 Überblick*

Die Rauheit und Welligkeit einer Oberfläche werden entsprechend Bild 47 als Gestaltabweichungen eines Geometrieelementes betrachtet, die der Formabweichung überlagert sind. Gleiten, Rollen, Haften, Dichten und weitere Funktionsfälle werden sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst, weshalb eine große Anzahl an Kenngrößen und Festlegungen entwickelt wurde.

Die Rauheit der Oberfläche wurde viele Jahre ausschließlich am Profil definiert [4287, 4288]. Seit der Veröffentlichung der DIN EN ISO 25178 Teil 2 [25178-2] im Jahr 2012 sind diese Festlegungen und Kenngrößen für die 3D-Oberflächenspezifikation erweitert worden.

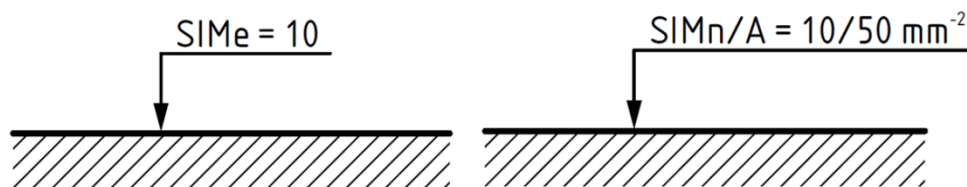
Oberflächenunvollkommenheiten, definiert in der DIN EN ISO 8785 [8785], sind unbeabsichtigte oder zufällige Elemente auf einer Oberfläche, die durch Lagerung, Herstellung oder Benutzung des Bauteils entstanden sind und getrennt von der heute definierten Rauheit und Welligkeit einer Oberfläche betrachtet werden.

Zusätzlich wird der Begriff Oberflächentextur als *„wiederholte oder zufällige Abweichung von der geometrischen Oberfläche in dreidimensionaler Topographie der Oberfläche“*

definiert [8785]. Als Anmerkung wird dazu aufgeführt, dass die Oberflächentextur die Rauheit, Welligkeit, den Oberflächencharakter, Oberflächenunvollkommenheiten und Formabweichungen in einem Teilbereich der Oberfläche beinhaltet.

### 5.8.2 Oberflächenunvollkommenheiten

Oberflächenunvollkommenheiten können, aber müssen nicht die Funktion einer Oberfläche beeinflussen [8785]. Deshalb ist es notwendig, die Anzahl und Art der zulässigen Unvollkommenheiten festzulegen. Die Merkmale und Kenngrößen der Oberflächenunvollkommenheiten werden mit dem Symbol SIM und einem Index gekennzeichnet (Tabelle 27). Eine beispielhafte Begrenzung der Oberflächenunvollkommenheiten veranschaulicht Bild 80.



*Bild 80: Beispiele für die Kennzeichnung der Oberflächenunvollkommenheiten [Nie12]*

Die Unvollkommenheiten sind zu einer Bezugsoberfläche definiert, die durch die höchste Spitze der Oberfläche verläuft und äquidistant zur berechneten Gaußoberfläche (siehe Kapitel 5.8.3) liegt [8785]. Die Größe der Bezugsfläche ist abhängig von der Ausdehnung der Oberflächenunvollkommenheit. Speziell kann die Anzahl der Oberflächenunvollkommenheiten zu einer Auswertefläche A festgelegt werden, die den Bereich für die Auswertung begrenzt.

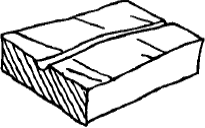
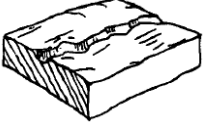
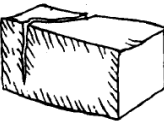
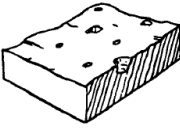
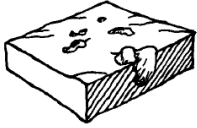

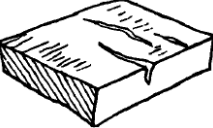











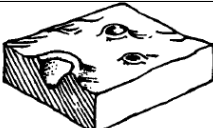

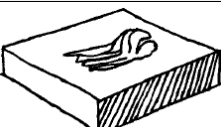


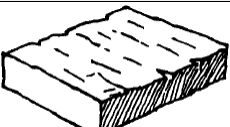



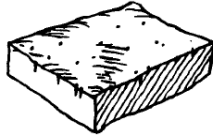
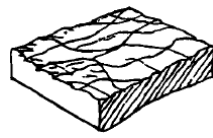

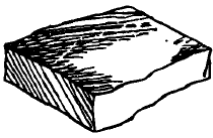
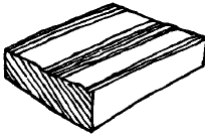
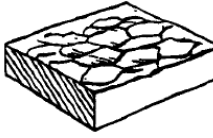
Tabelle 26: Merkmale und Kenngrößen der Oberflächenunvollkommenheiten [8785]

Benennung der Eigenschaften der Oberflächenunvollkommenheit	Abkürzung	Definition
Länge	$SIM_e$	Größtes Maß, gemessen parallel zur Bezugsoberfläche
Breite	$SIM_w$	Größtes Maß gemessen senkrecht zur Länge und parallel zur Bezugsoberfläche
Tiefe der einzelnen	$SIM_{sd}$	Größte Tiefe, gemessen von und senkrecht zur Bezugsoberfläche
Tiefe der kombinierten	$SIM_{cd}$	Abstand zwischen der Bezugsoberfläche und dem tiefsten Punkt, gemessen von und senkrecht zur Bezugsoberfläche
Höhe der einzelnen	$SIM_{sh}$	Größte Höhe, gemessen von und senkrecht zur Bezugsoberfläche
Höhe der kombinierten	$SIM_{eh}$	Abstand zwischen der Bezugsoberfläche und dem höchsten Punkt, gemessen von und senkrecht zur Bezugsoberfläche
Fläche der einzelnen	$SIM_a$	Fläche einer einzelnen Oberflächenunvollkommenheit, projiziert auf die Bezugsoberfläche
Gesamtfläche	$SIM_t$	Fläche, die der Summe der einzelnen Flächen innerhalb vereinbarter Grenzen entspricht
Anzahl	$SIM_n$	Anzahl über die gesamte Fläche innerhalb der vereinbarten Grenzen
Anzahl je Flächeneinheit	$SIM_n/A$	Anzahl über eine festgelegte Auswertefläche A

Es werden 31 verschiedene Oberflächenunvollkommenheiten unterschieden (Tabelle 27), die ausführlicher in der Norm DIN EN ISO 8785 [8785] beschrieben sind.

Tabelle 27: Arten von Oberflächenunvollkommenheiten [8785]

			
Riefe	Kratzer	Riss	Pore
			
Lunker	Schrumpfloch	Bruch, Sprung, Spalt	Kanten- verrundung
			
Einbeulung (konkav)	Delle	Auswuchs	Blase
			
Beule (konvex)	Schuppe	Einschluss	Grat
			
Gratippe	Ablagerung	Krater	Überlappung
			
Kerbschnitt	Aufreißer	Abdruck	Erosion




			
Korrosion	Grübchen	Mikrorisse	Fleck
			
Verfärbung	Streifen	Schichtartige Oberfläche	

Oberflächenunvollkommenheiten spielen bei der Bewertung von Rauheit eine wichtige Rolle. Riefen und Kratzer verfälschen die erfasste Oberfläche und führen zu unsicheren Rauheitswerten. In der DIN EN ISO 4288 [4288] ist festgelegt, dass die Unvollkommenheiten der Oberfläche nicht in die Bewertung der Rauheit einbezogen werden dürfen.

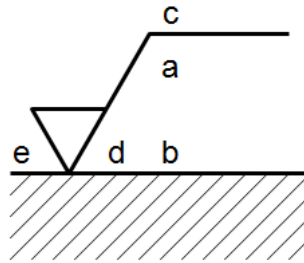
### 5.8.3 Rauheit und Welligkeit eines Profils

Die Spezifikation der Rauheit und Welligkeit zur Eintragung in der technischen Zeichnung ist in der Norm DIN EN ISO 1302 [1302] für das Profil festgelegt. Die Normen DIN EN ISO 4287 [4287] und DIN EN ISO 4288 [4288] beinhalten die Definitionen der Kenngrößen. Gekennzeichnet wird die Forderung an eine Oberfläche in der technischen Zeichnung mit dem Symbol in Tabelle 28.

Tabelle 28: Symbole zur Eintragung der Rauheit

Symbol	Erläuterung	Definition
	<b>APA</b> (Any Process Allowed)	<b>Grundsymbol:</b> Es darf nur dann allein benutzt werden, wenn es „betrachtete Oberfläche“ bedeutet oder wenn seine Bedeutung durch eine zusätzliche Angabe erklärt wird.
	<b>MRR</b> (Material Removal Required)	<b>Erweitertes Symbol:</b> Kennzeichnung für eine materialabtragend bearbeitete Oberfläche ohne nähere Angaben. Dieses Symbol darf nur dann allein verwendet werden, wenn seine Bedeutung ist: „Oberfläche, die materialabtragend bearbeitet werden muss“.
	<b>NMR</b> (No Material Removed)	<b>Erweitertes grafisches Symbol:</b> Eine Oberfläche, bei der eine materialabtragende Bearbeitung unzulässig ist. Dieses Symbol kann auch in Zeichnungen angewendet werden, die für einen bestimmten Arbeitsvorgang angefertigt sind, um deutlich zu machen, dass eine Oberfläche in dem Zustand des vorhergehenden Arbeitsganges zu belassen ist, unabhängig davon, ob dieser Zustand durch materialabtragende Bearbeitung oder auf andere Weise erreicht wurde.

Eine einzelne Anforderung an die Rauheit oder Welligkeit der Oberfläche wird unter dem Symbol an der Position a (Bild 81) eingetragen. Mehrere Anforderungen stehen untereinander. Über dem Symbol kann das Fertigungsverfahren oder z. B. die Art der Beschichtung vorgeschrieben werden. Ist eine Bearbeitungszugabe notwendig, dann steht diese Information vor dem Symbol.



a eine einzelne Anforderung an die Oberflächenbeschaffenheit

a und b zwei oder mehr Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit

c Fertigungsverfahren

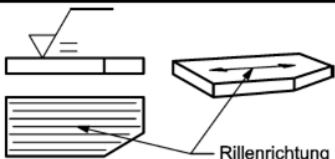
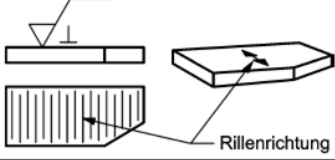
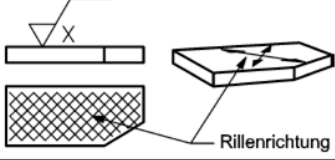
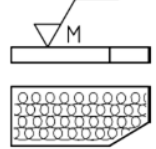

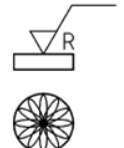
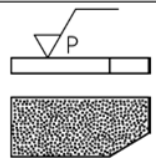
d Oberflächenrillen und -ausrichtung

e Bearbeitungszugabe

*Bild 81: Kennzeichnung der Anforderungen an die Oberfläche [1302]*

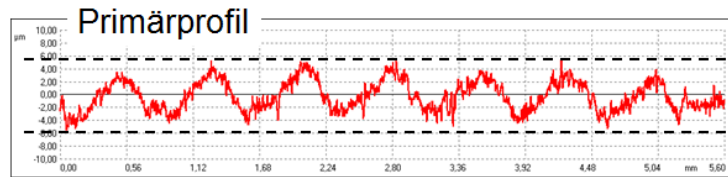
An der inneren unteren Position des Symbols können zusätzliche Angaben zur Richtung der Bearbeitung festgelegt werden. Diese als Oberflächenrillen bezeichneten Möglichkeiten enthält Tabelle 29.

Tabelle 29: Oberflächenrillen [1302]

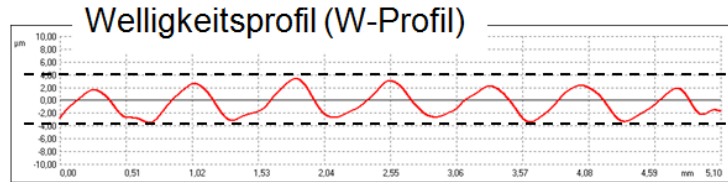
Graphisches Symbol	Auslegung und Beispiel	
=	Parallel zur Projektionsebene der Ansicht, in der das Symbol angewendet wird	
⊥	Rechtwinklig zur Projektionsebene der Ansicht, in der das Symbol angewendet wird	
X	Gekreuzt in zwei schrägen Richtungen zur Projektionsebene der Ansicht, in der das Symbol angewendet wird.	
M	Mehrfache Richtungen	
C	Annähernd zentrisch zur Mitte der Oberfläche, auf die sich das Symbol bezieht	
R	Annähernd radial zur Mitte der Oberfläche, auf die sich das Symbol bezieht	
P	Nichttrillige Oberfläche, ungerichtet oder muldig	
ANMERKUNG Wenn es notwendig ist, eine Oberflächenstruktur festzulegen, die durch die angegebenen Symbole nicht eindeutig definierbar ist, so kann dies durch eine geeignete Anmerkung auf der Zeichnung erfolgen.		

Kenngößen sind definiert an verschiedenen Profilen und Kurven sowie über bestimmte Längen. Es wird unterschieden in Primärprofil (P-Profil), Welligkeitsprofil (W-Profil) und Rauheitsprofil (R-Profil). Der Zusammenhang der Profile wird im Bild 82 gezeigt.

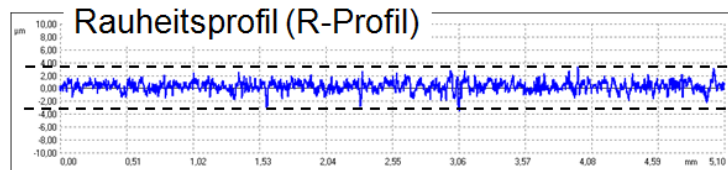
Das **P-Profil** ist die Ausgangsbasis für die digitale Profilverarbeitung und die Berechnung der Kenngrößen.



Das **W-Profil** entsteht durch aufeinander folgende Anwendung des  $\lambda_f$ -Filters und des  $\lambda_c$ -Filters.



**R-Profil** wird vom Primärprofil durch Abtrennen der langwelligen Profilanteile mit dem Profilfilter  $\lambda_c$  hergeleitet.



*Bild 82: Unterscheidung der Oberflächenprofile*

Als Kurven sind die Amplitudendichtekurve und die Materialtraganteilsurve beschrieben. Bezüglich der Länge wird unterschieden zwischen Einzelmessstrecke, Messstrecke und Taststrecke. Tabelle 30 zeigt die R-Kenngrößen mit der Strecke, für die sie definiert sind. In der DIN EN ISO 4287 werden P-, W- und R-Kenngrößen entsprechend dem Profil, aus dem sie berechnet werden, definiert. Alle in der DIN EN ISO 4287 [4287] definierten Kenngrößen sind für das P-, W- und R-Profil anwendbar.

*Tabelle 30: Beispiele für Kenngrößen und zugehörige Strecken*

Strecke	Beispiele für R-Kenngrößen die davon abgeleitet sind
Einzelmessstrecke	Rz, Ra, Rp, Rv, Rq, Rsk, Rku, Rsm
Messstrecke	Rt, Rmr(c)

Standardmäßig wird nur die obere Toleranzgrenze der Kenngröße festgelegt. Die untere Toleranzgrenze ist Null. Mit der Angabe U für „upper limit“ als obere Grenze und L für „lower limit“ als untere Grenze können auch beide Grenzwerte verschieden von Null festgelegt werden. Die Position des Buchstabens zeigt Bild 84.

Für die Kenngrößen, die an der Einzelmessstrecke definiert sind, ist festgelegt, dass das arithmetische Mittel aus fünf Einzelmessstrecken zur Bewertung berechnet wird. Diese standardmäßige Festlegung ist durch den Abstand von zwei Leerzeichen zwischen der Toleranzangabe (in  $\mu\text{m}$ ) und der Kenngröße gekennzeichnet. Die Länge der Einzelmessstrecke ist durch Festlegungen in der Norm DIN EN ISO 4288 [4288] einem Rauheitsbereich zugeordnet. Dabei wird zwischen periodischen und aperiodischen Oberflächen unterschieden (Bild 83).

Periodisch		Einzelmessstrecke		Aperiodisch	
<b>RS<sub>m</sub> in mm</b>		<b>l<sub>r</sub> in mm</b>		<b>R<sub>a</sub> in <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>R<sub>z</sub> in <math>\mu\text{m}</math></b>
> 0,013 ... 0,04	→	0,08	←	> (0,006)... 0,02	> (0,025)... 0,1
> 0,04 ... 0,13	→	0,25	←	> 0,02 ... 0,1	> 0,1 ... 0,5
> 0,13 ... 0,4	→	0,8	←	> 0,10 ... 2,0	> 0,5 ... 10
> 0,4 ... 1,3	→	2,5	←	> 2,00 ... 10,0	> 10 ... 50
> 1,3 ... 4,0	→	8,0	←	> 10,0 ... 80,0	> 50 ... 200

Bild 83: Einzelmessstrecken für die Rauheit [nach 4288]

Die Länge der Einzelmessstrecke entspricht der Übertragungscharakteristik des Filters, der zur Trennung der Rauheit von der Welligkeit benötigt wird. Sollen die Standardfestlegungen nicht gelten, dann kann die Länge der Einzelmessstrecke, wie im Bild 84 gezeigt, eingetragen werden und zusätzlich die Anzahl der auszuwertenden Einzelmessstrecken festgelegt werden.

Standardmäßig gilt die 16%-Regel für die Auslegung der Toleranzgrenze, die besagt, dass die Oberfläche angenommen wird, wenn nicht mehr als 16% der Werte außerhalb der Grenze liegen. Mit dem Zusatz „max“ wird diese Regel außer Kraft gesetzt und kein Wert darf die Toleranzgrenze überschreiten.



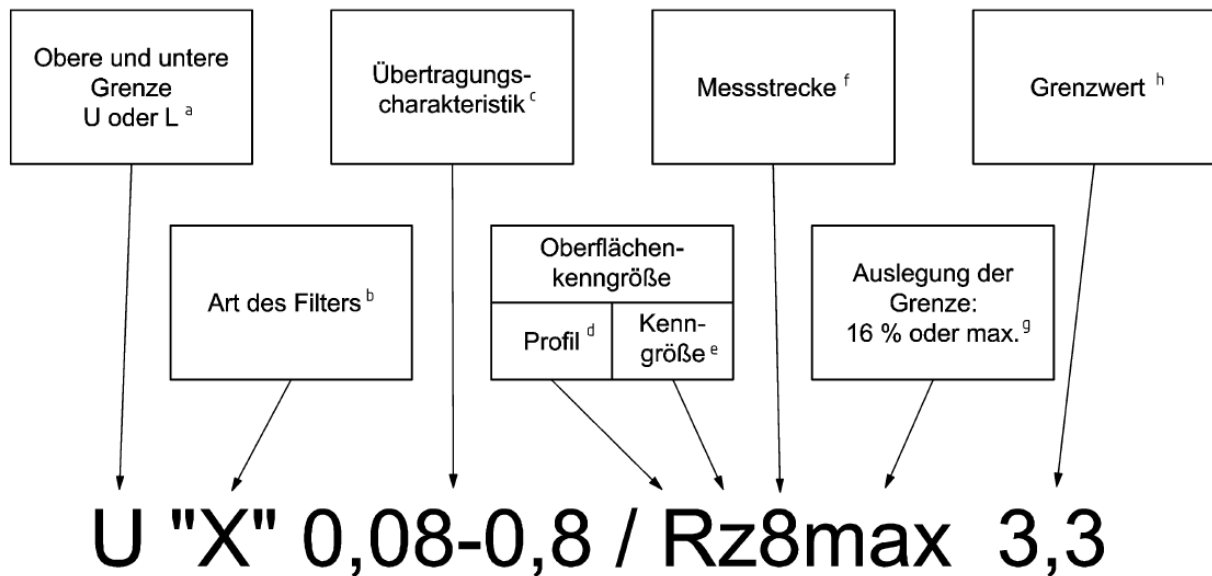


Bild 84: Angabe der Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit [1302]

Das Oberflächenprofilelement (Bild 85) bildet die Grundlage für die Definition und die Berechnung der Oberflächenkenngrößen. Ausgehend von einer Mittellinie, die entsprechend des auszuwertenden Profils unterschiedlich gebildet wird [4287], wird die maximale Ausprägung als Spitze  $Z_p$  (p für peak) und in entgegengesetzter Richtung als Tal  $Z_v$  (v für valley) ausgewählt. Beide zusammen ergeben die maximale Höhe des Profils. Der Schnittpunkt mit der Mittellinie kennzeichnet die Breite des Profilelementes  $X_s$ . Auf diese Weise werden  $P_t$ ,  $W_t$  und  $R_t$  als größte Höhe des Profils über die Messstrecke,  $P_z$ ,  $W_z$  und  $R_z$  als größte Höhe innerhalb der Einzelmessstrecke usw. definiert (siehe [4287]).

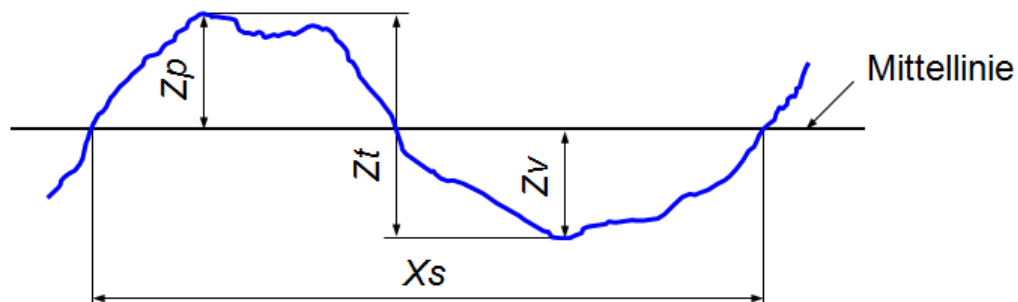
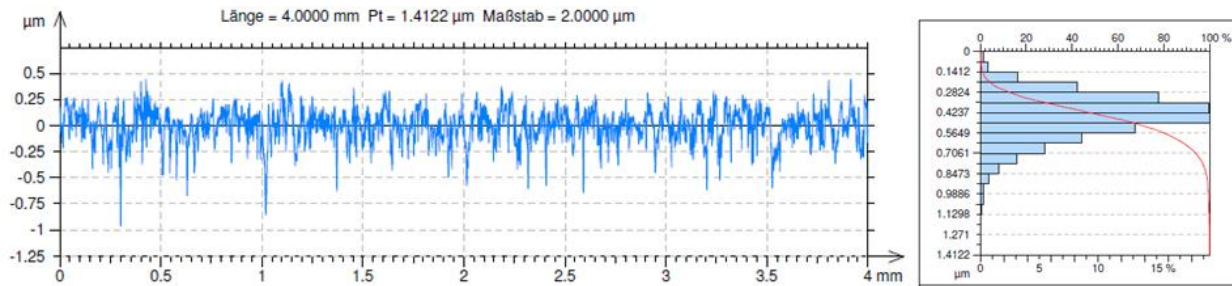


Bild 85: Oberflächenprofilelement [4287]

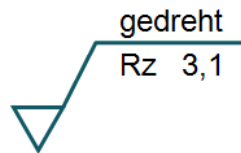
Die Verteilung der Amplituden im Profil wird durch die Amplitudendichtekurve dargestellt. Aus einem gemessenen Rauheitsprofil wurden im Bild 86 die Verteilung der

Amplituden und die Materialtraganteilkurve berechnet, an denen weitere Kenngrößen beschrieben sind.



*Bild 86: Gemessenes Profil mit Amplitudendichte- und Materialtraganteilkurve*

Die Spezifikation einer Rauheit zeigt beispielhaft Bild 87. Entsprechend dem Symbol wird ein Materialabtrag durch das Verfahren Drehen gefordert. Die Kenngröße  $R_z$  soll über fünf Einzelmessstrecken ausgewertet werden. Die obere Grenze ist mit  $3,1 \mu\text{m}$  festgelegt und die 16%-Regel gilt. Die Länge der Einzelmessstrecke beträgt  $0,8 \text{ mm}$  und wurde aus der Tabelle im Bild 83 abgeleitet.



*Bild 87: Beispiel für eine Oberflächenspezifikation*

Spezielle Rauheitskenngrößen sind für Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften in der DIN EN ISO 13565 Teil 1 bis 3 [13565-1, 13565-2, 13565-3] und für Motifkenngrößen in der DIN EN ISO 12085 [12085] festgelegt. Diese gelten ebenfalls nur für ein Oberflächenprofil.

#### 5.8.4 Rauheit einer Fläche

Unzureichende Definitionsmöglichkeiten und die Entwicklung der Oberflächenmesstechnik, insbesondere der optischen Messtechnik, haben dazu geführt, dass im September 2012 die Norm DIN EN ISO 25178 Teil 2 Begriffe und Oberflächenkenngrößen [25178-2] einer neuen Normenreihe zur flächenhaften Oberflächenbeschaffenheit veröffentlicht wurde. In dieser Norm sind die Definitionen und Parameter für die Ermittlung der Oberflächenbeschaffenheit durch flächenhafte Verfahren festgelegt. Eine Vielzahl neuer Kenngrößen ist darin enthalten, die teilweise

aus den 2D-Kenngrößen und der räumlichen Materialtraganteilskurve abgeleitet wurden. Es wird prinzipiell unterschieden in:

- Höhen-/Amplitudenparameter
- Räumliche Parameter
- Hybridparameter
- Funktionsbezogene Parameter des flächenhaften Materialanteils
- Volumenparameter für leere und materialgefüllte Bereiche und
- Strukturorientierte Parameter.

Der bei der 2D-Rauheit durch die Einzelmessstrecke oder Messstrecke festgelegte Auswertebereich wird bei der flächenhaften Betrachtung durch den Filter bestimmt. Der Auswertebereich ist quadratisch. Diese Regelungen enthält die DIN EN ISO 25178 Teil 3 [25178-3]. Die Spezifikation beinhaltet dafür die Angabe der Filterwerte.

Die Eintragung der Kenngrößen in der technischen Zeichnung oder am Modell soll in der DIN EN ISO 25178 Teil 1 festgelegt werden, die zum heutigen Zeitpunkt jedoch nur als nichtveröffentlichter Entwurf vorliegt. Geplant ist die Nutzung des gleichen Symbols mit der Ergänzung eines A (areal) für Fläche über dem Symbol.



*Bild 88: Vorschlag für die Kennzeichnung von 3D-Oberflächenparametern [25178-1]*

In Anbetracht der Vielfalt der definierten Kenngrößen und Regeln wird an dieser Stelle für weitere Informationen auf die Normenreihe DIN EN ISO 25178 ff. verwiesen.

Die Anwendung des GPS-Systems setzt die Kenntnisse der Grund-, Globalen- und Allgemeinen GPS-Normen voraus, die auch im Rahmen dieser Arbeit dargestellt wurden.

## 6 Vorgehensweise zur funktionsgerechten Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem GPS-System

### 6.1 Bisherige Ansätze

Für die Spezifikation geometrischer Eigenschaften zur Abbildung der funktionalen Anforderungen existieren verschiedene Vorgehensweisen, wie die Regeln und Festlegungen angewendet werden sollten. Eine Möglichkeit der Unterstützung des Konstrukteurs bei der geometrischen Spezifikation von Funktionseigenschaften ist die Zuordnung der Form-, Richtungs- und Ortstoleranzen zu verschiedenen Geometrieelementen. In Form einer Matrix 1 für Kanten und Flächen (Bild 89) und einer Matrix 2 für zentrale Elemente und Größenmaße (Bild 90) wurde an der TU Chemnitz [Lei03] diese Vorgehensweise grafisch dargestellt.

Matrix Tolerierte Elemente – zugeordnete Form- und Lagetoleranzen (Teil 1)

	Kanten		Flächen		
	gerade	nicht gerade	eben	gekrümmt (zylindrisch)	allgemein
	●		●	●	
			●		
		●		●	●
		●		●	
					●
	●		●	●	
	●		●	●	
	●		●	●	
				●	
				●	●
			●		
				●	●
			●		
techn. Anwendung (Auswahl)					
	Führungslinal	Kreismesser	Bestimmfläche	Wälzlagersitz	Kurvenscheibe

Bild 89: Matrix 1 für Kanten und Flächen in Verbindung mit den Toleranzarten [Lei03]

Matrix Tolerierte Elemente – zugeordnete Form- und Lagetoleranzen (Teil 2)

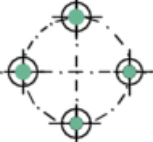
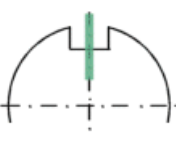
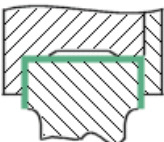
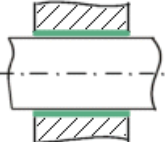
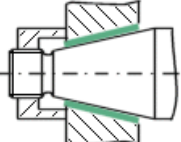
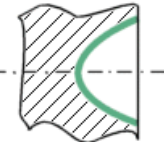
	Achsen	Mittenebenen (Symmetrieebenen)	Körper (Funktionspaarungen)			
			Quader	Zylinder	Kegel	allg. Rotationskörper
—	●		●	●	●	
□			●			
○				●	●	●
⌒				●		
⌒					●	●
⌒						●
//	●	●				
⊥	●	●	●	●	●	●
∠	●	●	●	●	●	●
⊕	●		●	●	●	●
⊙	●			●	●	●
≡	●	●	●	●	●	●
↗ <sub>R</sub>				●	●	●
↗ <sub>P</sub>						
↗ <sub>R</sub>				●	●	●
↗ <sub>P</sub>						
techn. Anwendung (Auswahl)						
	Bohrungsmitten	Nut auf Welle	Flachführung	Lagerung	Welle-Nabe-Verbindung	Formwerkzeug

Bild 90: Matrix 2 für Achsen und Mittelebenen sowie Körper in Verbindung mit den Toleranzarten [Lei03]

Diese Art der Hilfestellung ist ein guter Ansatz, führt aber nicht zu einer systematischen und vor allem vollständigen Spezifikation, da Oberflächenangaben und Dimensionen nicht in Zusammenhang dazu betrachtet werden.

In Klein [Kle12] wird die Tolerierung über einen Fragenkatalog angeleitet. Folgende Fragestellungen müssen beantwortet werden:

- (1) „Welcher **Tolerierungsgrundsatz** soll gelten?
- (2) Welche Norm der **Allgemeintoleranzen** ist anzuwenden?
- (3) Welche sind die wesentlichen **funktionswichtigen Elemente**?
- (4) Worauf kommt es bei den **funktionswichtigen Elementen** an?
- (5) Welche Elemente sollten als **Bezug** gewählt werden?
- (6) Welche **Lagetoleranzen** werden benötigt?
- (7) Wie groß sind die **Lagetoleranzen** festzusetzen?

- (8) *Wo sind Einzeleintragungen von **Formtoleranzen** nötig?*
- (9) *Wie groß sollen die **Formtoleranzen** sein?*
- (10) *Kann eine **Material-Bedingung** ausgenutzt werden?“*

Während der Tolerierung werden diese Fragen weiter untersetzt. Als Beispiel wird das Thema Bezug für ein Element näher betrachtet. Folgende Fragen werden dafür formuliert [Kle12]:

- *„Auf welche Elemente sollten die Lageabweichungen bezogen werden?*
- *Auf welchem Element liegt das Bauteil bei der Fertigung auf?*
- *Auf welchem Element liegt es bei der Prüfung auf?*
- *Müssen die Bezugselemente selbst auch toleriert werden?“*

In Henzold [Hen11] wird ebenfalls durch Listen die Richtungs- und Ortstolerierung, die Formtolerierung und die Tolerierungsart abgefragt. Bei der Richtungs- und Ortstolerierung muss entschieden werden:

- Welche Geometrieelemente sind miteinander verbunden?
- Ist die Allgemeintoleranz ausreichend? Wenn nein:
- Ist ein Geometrieelement als Bezug festzulegen?
- Sollte durch die Wahl der gemeinsamen Toleranzzone auf die Festlegung von Bezugselementen verzichtet werden?
- Sollten ein Bezugssystem bzw. Bezugsstellen festgelegt werden?
- Welche Eigenschaften sind zu tolerieren?
- Sind Abhängigkeiten zutreffend?
- Welche Weite hat die Toleranzzone?

Bei der Formtolerierung muss entschieden werden:

- Welche Eigenschaft ist zu tolerieren?
- Ist die Hüllbedingung ausreichend, um die Formabweichungen einzuschränken?
- Ist die Allgemeintoleranz ausreichend? Wenn nein:

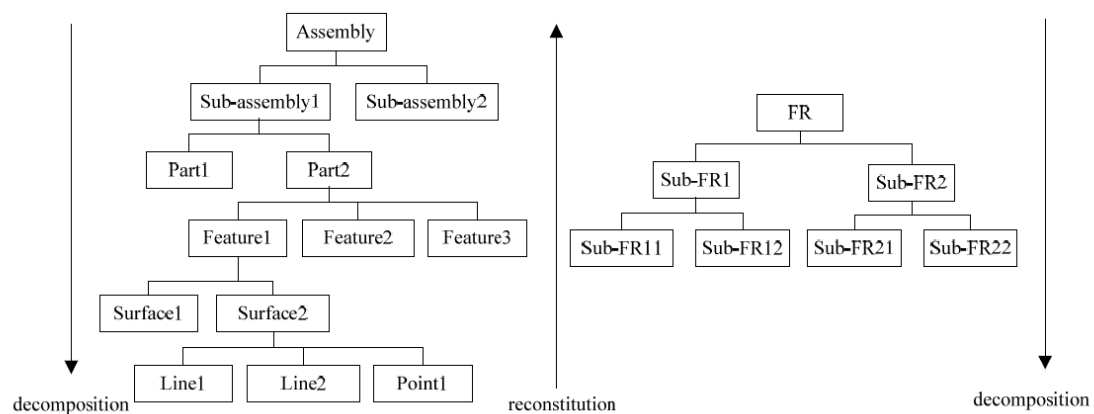
- Ist die Formabweichung durch eine Richtungs- oder Ortstoleranz bereits ausreichend begrenzt? Wenn nein:
- Wie groß ist die Formtoleranz?

Bezüglich der Tolerierungsart sind entscheidende Fragen:

- Sind Passungen zu erfüllen?
- Sind Maximum- oder Minimum-Material-Bedingungen anzuwenden?
- Ist eine Gewichtsbeschränkung zu realisieren?
- Welche Art der Funktion soll realisiert werden: Presspassung, Kinematiken, Optik, elektrische Kontakte, Einschraub- oder Einstecklöcher?
- Sind die Teile flexibel?

Darüber hinaus empfiehlt Henzold [Hen11], wie auch in der ASME Y14.5 [Y14.5] festgelegt ist, abgeleitete Geometrielemente von Größenmaßelementen mit Positionstoleranzen und Nicht-Größenmaße mit Profilformtoleranzen zu begrenzen.

Interessant ist auch ein Ansatz von Zhang Heng [Heg12], der auf der Dekomposition und Rekonstruktion von Baugruppen (assembly) und Bauteilen (part) aufbaut (Bild 91) und ausgehend von der Nenngeometrie die Komponenten (feature), Geometrielemente (surface, line, point) und Funktionseigenschaften (functional requirement FR) identifiziert und toleriert.



*Bild 91: Dekomposition und Rekonstruktion der Struktur und Funktionsanforderungen  
[Heg12]*

Die aus diesem Ansatz abgeleitete Spezifikation erfolgt über eine sogenannte Wachstums-Entwicklungs-Theorie (growth design theory).

Leonard [Leo12] hat ebenfalls erkannt, dass eine Vorgehensweise zur geometrischen Spezifikation notwendig ist, und stellt verschiedene Kriterien auf, die diese Vorgehensweise mit den dafür festgelegten Regeln erfüllen muss:

- Regelbasierte Spezifikationsalgorithmen: Können für jede Geometrie angewendet werden.
- Widerspruchsfrei: Jede beliebige Kombination von Eintragungen am Modell ist sinnvoll.
- Eineindeutig: Eine Toleranzeintragung hat eine Bedeutung.
- Losgelöst: Alle geometrischen Eigenschaften sollten unabhängig voneinander eingeschränkt werden können.
- Einfach: Eine einfache Sprache, um Widersprüche zu vermeiden.
- Vielfältig: Verschiedene Arten der geometrischen Eigenschaften sollten aufgezeigt werden, um die unterschiedlichen Funktionen abbilden zu können.
- Allgemeintoleranzen: Auch als Defaultfestlegungen bezeichnet, sollten sie eine Spezifikation des gesamten Bauteils ermöglichen, so als wären alle geometrischen Eigenschaften nicht funktionsrelevant.
- Funktionsgerecht: Abweichungen, die am Modell toleriert werden, sollten die Funktion bestmöglich darstellen.

Umgesetzt wurden diese Forderungen in einem sogenannten vereinfachten geometrischen Toleranzmodell, wie in Bild 92 gezeigt. Die Grundlage ist die Partition und Assoziation idealer Geometrieelemente am realen Bauteil und der Vergleich mit einer Lehrenkonstruktion, abgeleitet aus den Toleranzen.



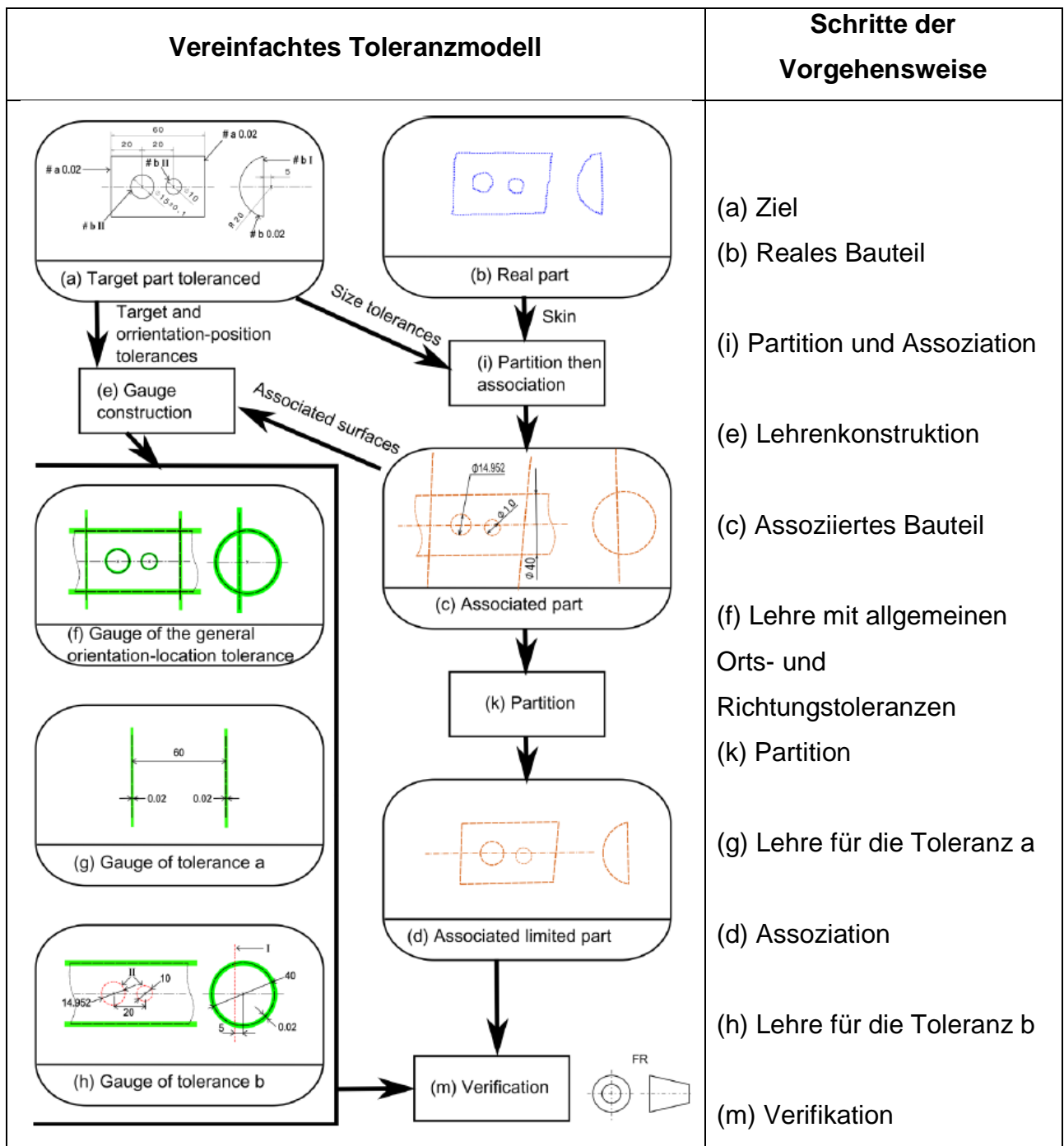


Bild 92: Vereinfachtes geometrisches Toleranzmodell [Leo12] mit Auflistung der einzelnen Schritte

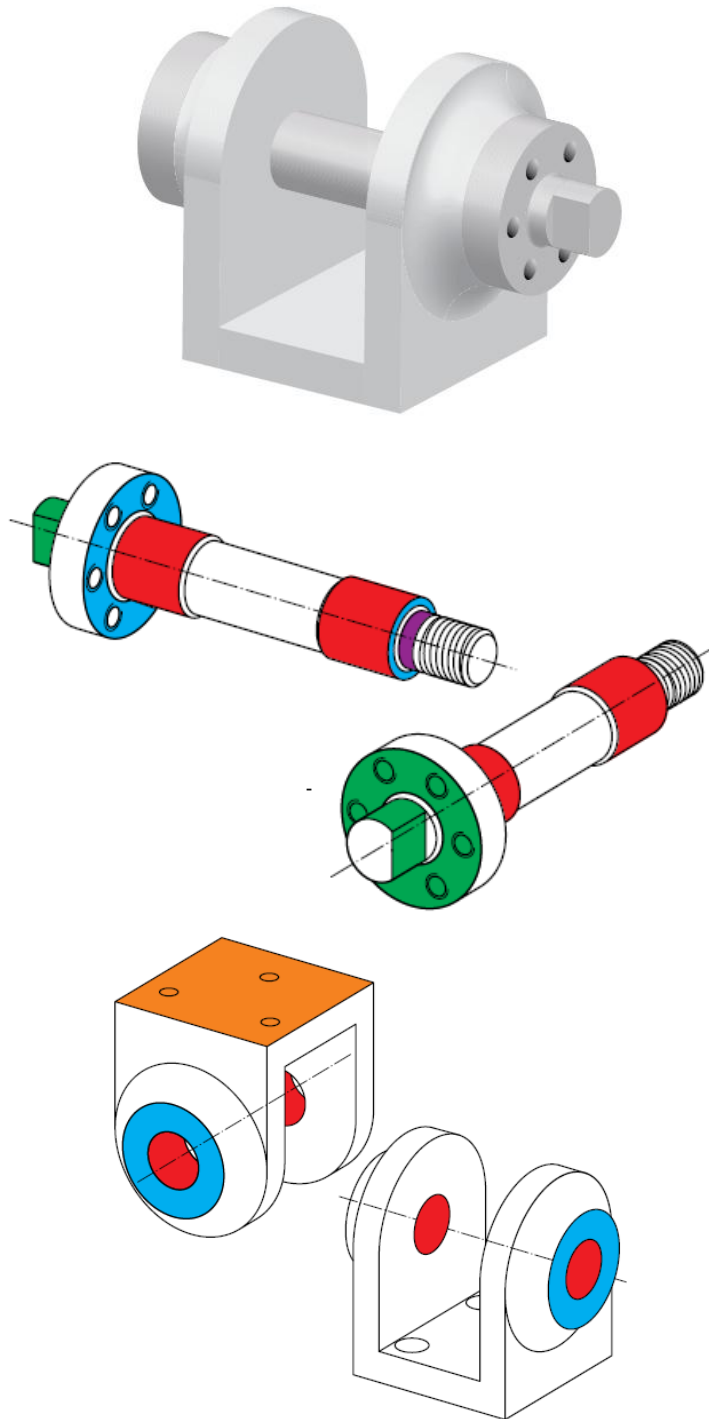
Weiterführende Untersuchungen sind notwendig, um den Einsatz des vereinfachten Toleranzmodells bewerten zu können.

Auf der Grundlage des GPS-Systems haben Per Bennich und Henrik Nielsen eine 8-Punkte-Toleranzprozedur (IfGPS 8-point tolerancing procedure™) [Nie12] entwickelt. Diese acht Schritte enthält die Tabelle 31.

*Tabelle 31: IfGPS 8-point tolerance procedure™ [Nie12]*

<b>IfGPS 8-point tolerancing procedure™</b>	<b>IfGPS 8-Punkte-Toleranzprozedur™</b>
1. Establishment of datum systems	1. Bezugssystem festlegen
2. Tolerancing of features of size	2. Tolerierung der Größenmaßelemente
3. Positioning of features with fixed tolerances	3. Eintragung der Toleranzen, die durch das Bezugssystem in allen Invarianzgraden gebunden sind
4. Mobile tolerances	4. Eintragung der Toleranzen, bei denen nicht alle Invarianzgrade durch das Bezugssystem gebunden sind
5. Unrelated form tolerances	5. Formtoleranzen, die ohne Bindung von Invarianzgraden durch eine Beziehung zum Bezugssystem eingetragen werden
6. Combination of tolerances	6. Abhängigkeiten von Toleranzen
7. Surface texture tolerances	7. Oberflächenbeschaffenheit
8. Edge tolerances	8. Kantentoleranzen

Diese Vorgehensweise wurde an einer Baugruppe, dargestellt im Bild 93, umgesetzt. Zur funktionsgerechten Spezifikation ist es notwendig, die funktionsbestimmenden Geometrieelemente zu identifizieren. Die Einzelteile im Bild 93 wurden dafür bezüglich der funktionsentscheidenden Geometrieelemente gekennzeichnet; ein sinnvoller Ansatz, um aus funktionsorientierter Sicht, die geometrischen Eigenschaften festzulegen [Ebe12].



*Bild 93: Baugruppe mit Einzelteilen, an denen die Funktionsflächen gekennzeichnet sind*  
[Nie12]

In den technischen Zeichnungen für die Aufnahme (Bild 94) und die Welle (Bild 95) wurde die IfGPS 8-point tolerancing procedure™ für eine vollständige Spezifikation umgesetzt.

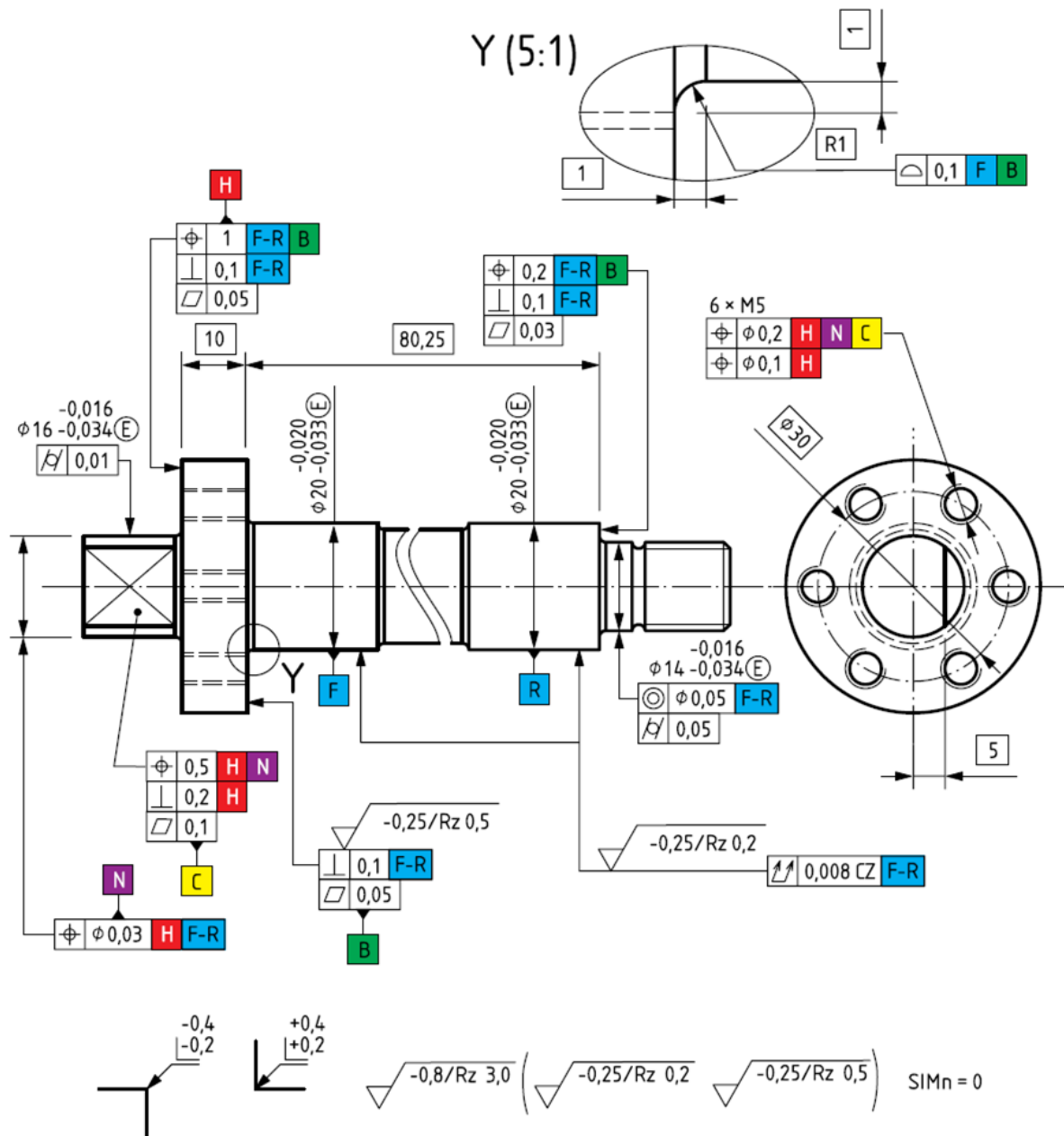


Bild 94: Vollständig tolerierte Welle [Nie12]

Die Spezifikation in den einzelnen Schritten entsprechend der 8 Punkte wird detailliert in „The ISO Geometrical Product Specifications Handbook“ [Nie12] hergeleitet.

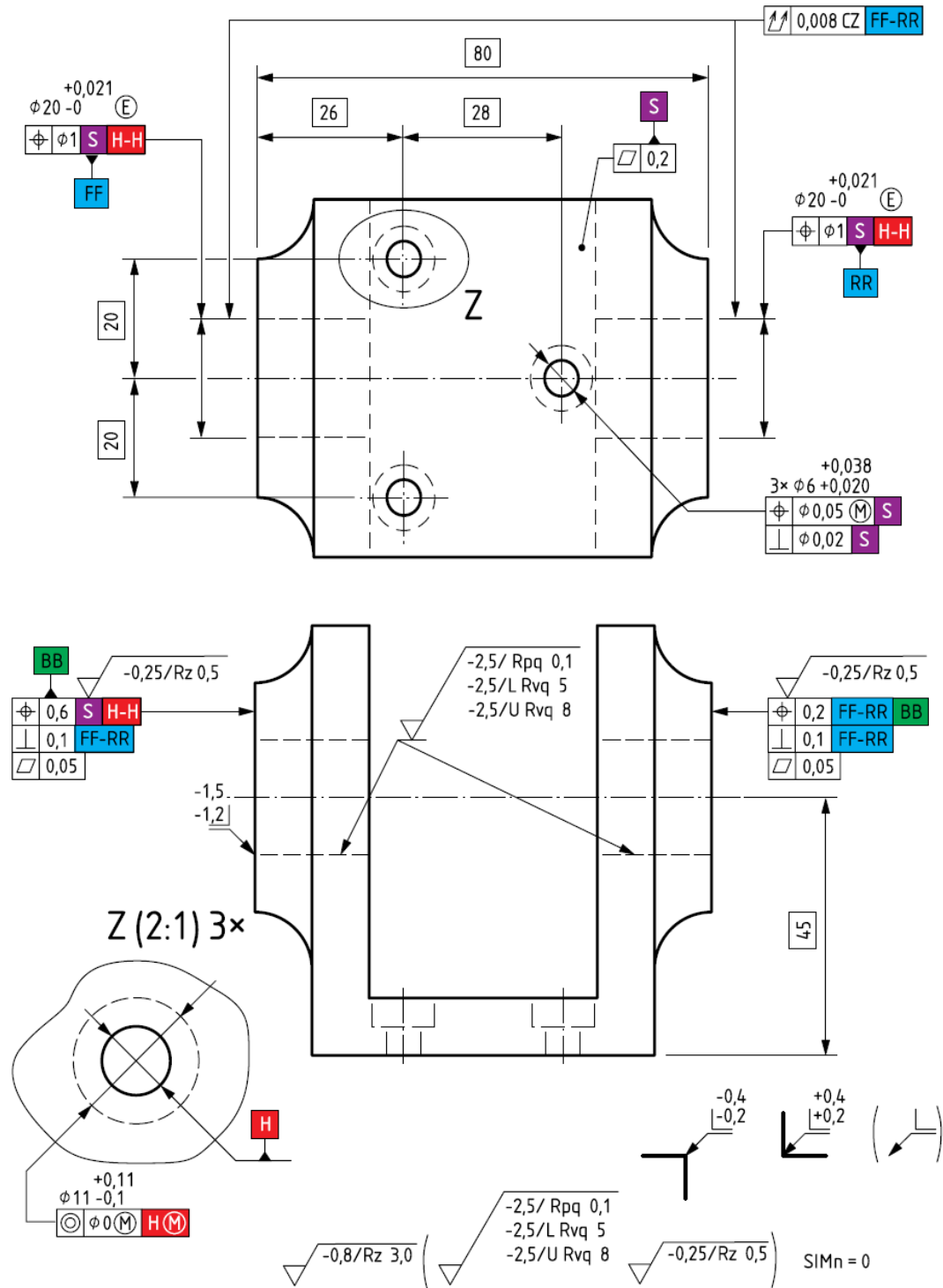


Bild 95: Vollständig tolerierte Aufnahme [Nie12]

Diese Zeichnungen spiegeln die derzeit im GPS-System vorhandenen Möglichkeiten der funktionsgerechten Spezifikation wider.

## 6.2 Handlungsempfehlung

Entsprechend der Zielstellung, eine funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften von Bauteilen mit dem GPS-System festlegen zu können, wurde das im Folgenden vorgestellte Spezifikationsmodell (Bild 96) abgeleitet. Die in den bisherigen Ansätzen aufgezeigten Ideen wurden in diesen Schritten mit aufgenommen und systematisiert.

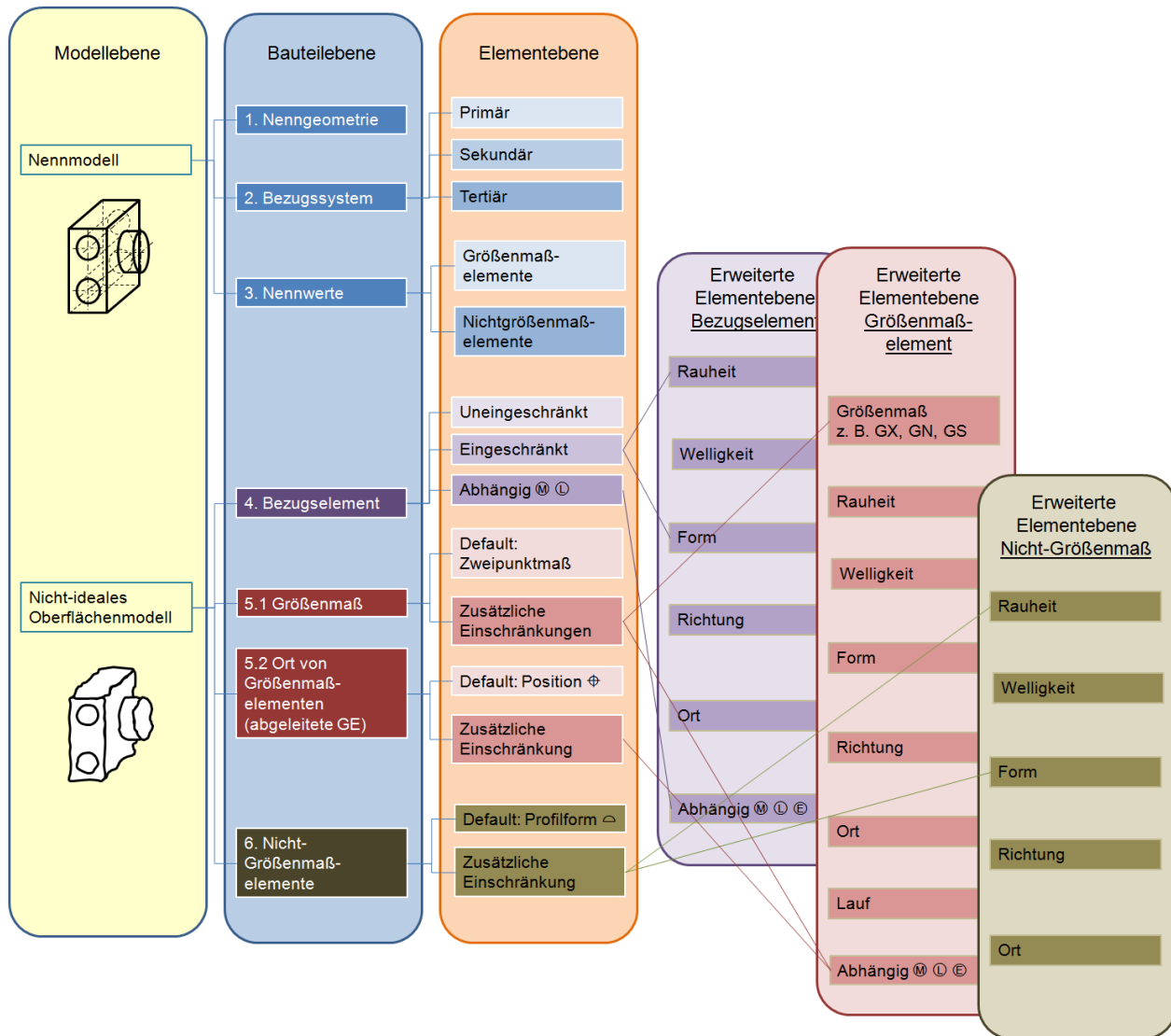


Bild 96: Funktionsgerechtes geometrisches Spezifikationsmodell

Das Spezifikationsmodell definiert sechs Schritte, die vom Nennmodell ausgehen:

***(I) Festlegungen am Nennmodell***

1. Aufbau der Nenngestalt
2. Festlegung eines funktionsgerechten Bezugssystems und weiterer Bezüge
3. Festlegung der Nennwerte zum Bezugssystem und den weiteren Bezügen

***(II) Festlegungen am Nicht-idealen Oberflächenmodell***

4. Festlegung der Nebenbedingungen für Bezugselemente
5. Identifikation von Größenmaßelementen unter funktionalen Gesichtspunkten mit Definition des Größenmaßes und dem Ort des Größenmaßelementes zum Bezugssystem
6. Begrenzung der Nicht-Größenmaßelemente.

Ausgangsbasis der funktionsgerechten Spezifikation ist das Nennmodell mit den Nennwerten für die Dimension des Bauteils. Neu bei der vorgestellten Vorgehensweise ist, dass ein Bezugssystem bereits im Nennmodell mit festgelegt werden muss, um die Nennwerte funktionsorientiert einzutragen. Das Bezugssystem legt z. B. die Schnittstelle zu anderen Bauteilen fest und sollte rein auf Basis der Funktion ausgewählt werden. Kontaktflächen, Führungselemente oder z. B. Fixierungselemente sollten als primärer, sekundärer und tertiärer Bezug gekennzeichnet werden, wobei die verschiedenen Funktionseigenschaften die Reihenfolge festlegen. Zusätzliche Bezüge können ebenfalls definiert werden. Dafür bieten das Nennmodell und der Ansatz der Dekomposition und Rekonstruktion eine gute Ausgangsbasis.

Der nächste Schritt erfordert die Visualisierung eines nicht-idealen Oberflächenmodells, welches durch die Herstellung Abweichungen aufweisen wird. Abgeleitet aus den Funktionsgrenzen sind diese Abweichungen durch Toleranzen einzuschränken. Mit der Festlegung der Funktionsgrenzen bei der Spezifikation können alle Einschränkungen dieser Grenzen, die durch die nachfolgenden Operationen am Bauteil entstehen, abgeleitet werden, ohne die Funktion des Bauteils zu gefährden.

Die als Bezug definierten Geometrieelemente stellen Funktionselemente oder zur Funktionsdefinition notwendige Elemente dar. Je nach Funktionsfall kann ggf. für die

Bezugselemente eine zusätzliche Einschränkung durch Rauheits- und/oder Formtoleranzen nötig sein. Sollen z. B. Maximum-Material-Bedingungen gelten, kann auch diese Festlegung getroffen werden. Die ggf. weiter einschränkenden Nebenbedingungen für den sekundären und tertiären Bezug sind in diesem Schritt einzutragen.

Im nächsten Schritt werden die Größenmaßelemente betrachtet und zuerst bezüglich der zu erfüllenden Funktion bewertet. Werden diese Größenmaßelemente genutzt, um das Paaren sicherzustellen, dann kann dafür die Hüllbedingung angewendet werden, die eine Abhängigkeit des Maßes zur Form- und Richtungsabweichung des Größenmaßelementes festlegt. Anderenfalls gilt das Zweipunktmaß. Es können auch weitere Einschränkungen entsprechend der DIN EN ISO 14405 Teil 1 oder bezüglich der Form und Richtung des Größenmaßelementes vorgenommen werden. Wie das Beispiel im Bild 97 verdeutlicht, können zwei gegenüberliegende parallele Flächen auch als Nicht-Größenmaßelemente betrachtet werden, wenn keine Paarungsfunktion gewährleistet werden muss.

Im fünften Schritt werden auch die noch nicht gebundenen Invarianzgrade der Größenmaßelemente zum Bezugssystem begrenzt. Aus den Ausführungen zu den heutigen Spezifikationsmöglichkeiten wird deutlich, dass Ortstoleranzen zu den größtmöglichen Einschränkungen für ein Geometrieelement führen und deshalb für eine vereinfachte Spezifikation die Übersichtlichkeit der technischen Zeichnung bestmöglich erhalten. Mit der Festlegung einer Toleranzzone für die Positionstoleranz am abgeleiteten Geometrieelement des Größenmaßelementes und einem TED, der dem Nennwert aus dem Nennmodell entspricht, wird die Ortsabweichung des Größenmaßelementes gegenüber dem Bezugssystem begrenzt.

Abschließend sind für alle weiteren Geometrieelemente, die den Nicht-Größenmaßelementen entsprechen, die Zone der zulässigen Abweichungen und der Ort dieser Zone gegenüber dem Bezugssystem einzuschränken. Wird dafür die Profilformtolerierung angewendet, können auch Radien, Kanten und beliebige Formen



auf gleiche Weise toleriert werden. Die Nennwerte des Nennmodells werden wieder als TED gekennzeichnet.

Müssen aus funktionellen Gründen spezielle Anforderungen an die Geometrieelemente gestellt werden, dann können zusätzliche Einschränkungen durch Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit, Form-, Orts- oder Richtungstoleranzen eingetragen werden. Diese Vorgehensweise ist in dem Spezifikationsmodell für die funktionsgerechte geometrische Spezifikation (Bild 96) zusammengestellt. Bei den erweiterten Möglichkeiten sind verschiedene Zusammenhänge zusätzlich zu beachten. Richtungstoleranzen haben keinen Ort und sind deshalb nur zur Einschränkung von Ortstoleranzen oder Größenmaßelementen zu verwenden. Für Lauftoleranzen sind nur zentrale Linien als Bezug auswählbar. Gleiches gilt für die Symmetrietoleranz, wobei sowohl zentrale Linien als auch Flächen als Bezug verwendet werden können.

Beispielhaft ist die funktionsgerechte Spezifikation im Bild 97 umgesetzt. Das Bezugssystem, gebildet aus der Grundfläche und Seitenfläche gemeinsam mit einer Bohrung, wird aus dieser Funktion des vereinfachten Hydraulikventils abgeleitet. Profilform- und Positionstoleranzen sind gegenüber diesem Bezugssystem festgelegt. Der Radius wurde ebenfalls mit einer Profilformtoleranz zu weiteren Bezügen angegeben. Beispielhaft ist auch die Oberflächenbeschaffenheit weiter eingeschränkt. Die farbig markierten Bezüge unterstützen die Veranschaulichung der Tolerierung.

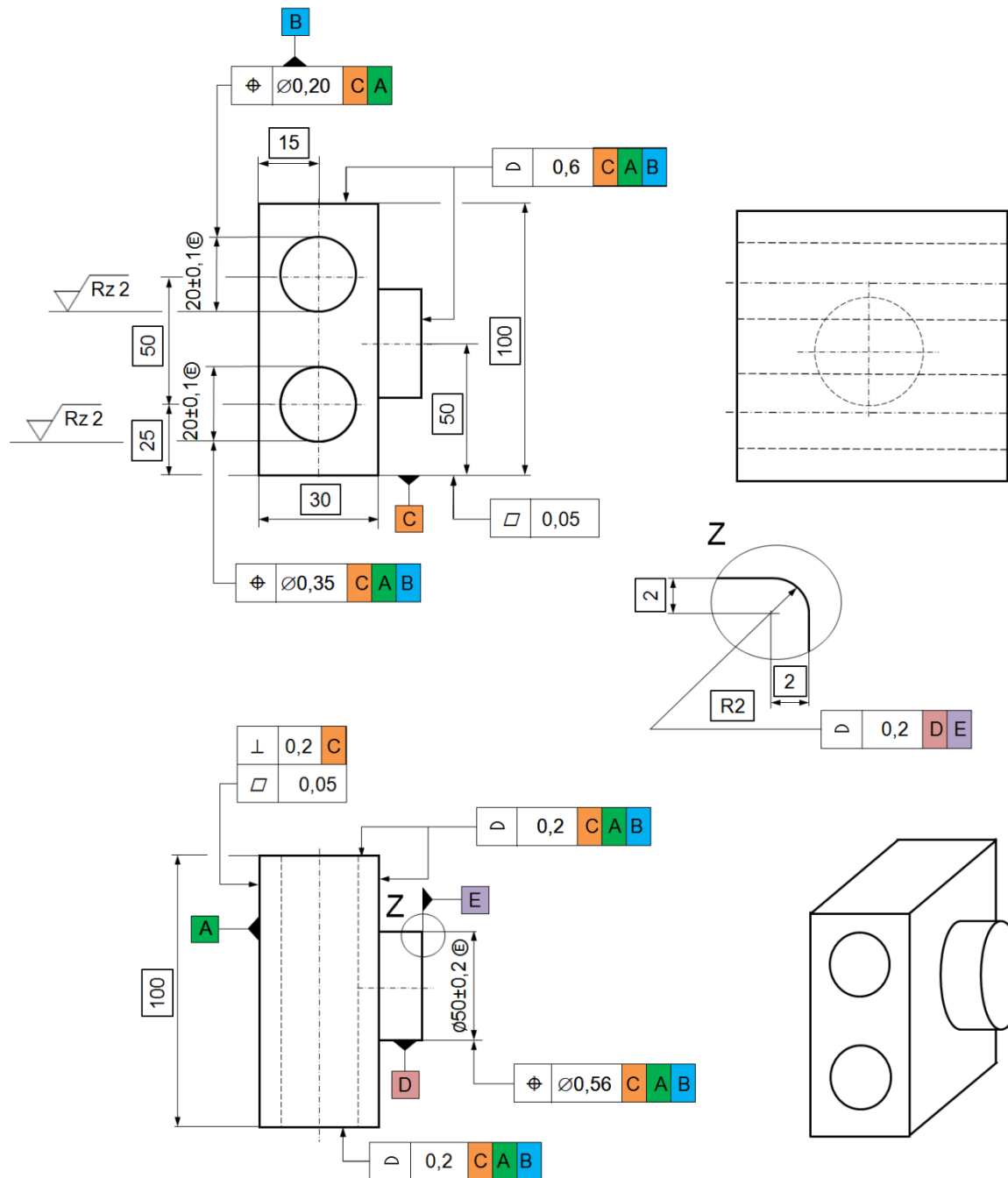


Bild 97: Funktionsgerechte Tolerierung von Abständen und Größenmaßelementen in einem Bezugssystem

Weiterführende Einschränkungen sind am Bauteil in Bild 97 nicht auszuschließen, aber aus Gründen der Übersicht vernachlässigt. Die Komplexität ist eine derzeit ungelöste Problematik des GPS-Systems.

## **7 Bewertung des GPS-Systems**

Die Auseinandersetzung mit den Normen im GPS-System und der darüber hinaus vorhandenen Literatur gestattet die Darstellung gegebener Defizite, um weiterführende Forschungs- und Entwicklungsaufgaben für die Normungsgremien als auch die Forschungseinrichtungen darzulegen.

Die Notwendigkeit, geometrische Eigenschaften von Bauteilen zu spezifizieren und sicherzustellen, dass diese Eigenschaften hergestellt und nachgewiesen werden können, erfordert ein einheitliches System, um vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können. Die Arbeit zeigt auf, dass umfangreiche Möglichkeiten vorhanden sind und funktionsgerechte Spezifikationen damit erreicht werden können. Die Entwicklung von Modellen und damit in Verbindung stehenden Geometrieelementen und Operationen ist ein gelungener Ansatz für ein ganzheitliches System.

Als entscheidende Begrenzungen bezüglich der Anwendung und Akzeptanz dieses GPS-Systems sind die umfangreichen Festlegungen in vielen verschiedenen Normen herausgestellt, deren aktueller Stand entweder gar nicht bekannt oder aufgrund der komplizierten Sprache nur schwer verständlich ist. Es existiert aktuell keine Zusammenstellung, die die Inhalte aufbereitet und die Verknüpfungen der Normen untereinander dokumentiert. Ansätze, die Matrix und die damit verbundenen Normen als interaktives Modul zu gestalten, sind nicht in deutscher Sprache vorhanden und seit dem Jahr 2006 unverändert [GPS06].

Speziell die GPS-Grundnormen befinden sich derzeit in einem großen Wandlungsprozess, was zu häufigen Überschneidungen von Definitionen und Festlegungen führt. Das GPS-System lebt jedoch von der Symbolik und Sprache, die dafür festgelegt ist. Die Unbeständigkeit bei der Übersetzung der englischen Begriffe führt zu Unklarheiten in den Normen. Selbst während der Erstellung dieser Arbeit wurden neue Begriffe in den Normen festgelegt, die nicht alle integriert werden konnten. Anlage 1 enthält deshalb eine Liste mit den Begriffen, wie sie in den ISO-Normen festgelegt sind und übersetzt wurden.

In den Normen wird als weiterer entscheidender Nachteil nicht klar zwischen den Funktionseigenschaften, den Herstellanforderungen und den Verifikationsverfahren unterschieden. Das kann darin begründet sein, dass die Herstellung im Dualitätsgedanken Spezifikation – Verifikation nicht enthalten ist. Für den Konformitätsnachweis des Bauteils sind jedoch zwei Betrachtungsweisen nötig. Einerseits werden in der Entwicklung und Einzelfertigung die Eigenschaften des Bauteils direkt bewertet, aber andererseits werden in einer Serienfertigung aus produktionstechnischer Sicht die Eigenschaften des Bauteils mit der Überwachung des Herstellprozesses sichergestellt. Festlegungen zur Verifikation in der Spezifikation, wie sie heute als Ergänzung zur DIN EN ISO 1101 entwickelt werden [Grö11], sind aus diesem Grund nicht zu befürworten.

Der Ansatz, die möglichen Abweichungen eines Bauteils am nicht-idealen Oberflächenmodell darzustellen, führt heute noch nicht zur beabsichtigten Verbesserung der Spezifikation, weil die Vorstellung, wie das nicht-ideale Oberflächenmodell aussieht, der Auslegung des Entwicklers überlassen wird. Aufgrund der fehlenden Betrachtung des Herstellverfahrens ist eine Simulation schwer abzuleiten. Nur wenige Forschungsarbeiten haben die Simulation des nicht-idealen Oberflächenmodells bisher fokussiert. Unlängst veröffentlicht wurde ein Ansatz von Zhang [Zha12], der Abweichungen mit der Monte Carlo Methode und anderen Werkzeugen simuliert.

Aus der Zuordnung der geometrischen Eigenschaften zu den Geometrieelementen wird empfohlen, die Allgemeine GPS-Matrix zu überarbeiten, um die neu gewonnenen Erkenntnisse zur Zuordnung der geometrischen Eigenschaften abzubilden. Es ist zu untersuchen, inwieweit eine Unterteilung in Nicht-Größenmaßelemente und Größenmaßelemente als Grundlage festgelegt werden könnte, da z. B. das Größenmaß nur für Größenmaßelemente angewendet wird. Prinzipiell sollten zum jetzigen Zeitpunkt Größenmaß, Oberflächenbeschaffenheit, Form, Richtung, Ort und Lauf als geometrische Eigenschaften ausreichen. Bezüge und der theoretisch genaue Abstand sollten als übergeordnete Festlegungen beschrieben werden, weil sie dem Nennmodell bereits zugeordnet werden können. Aus der Beschreibung, z. B. des Kettengliedes 3, kann nicht klar abgeleitet werden, welche Normen eingegliedert werden müssen. Hier

sollte eindeutiger erläutert werden, was definiert werden soll. Somit würde sich auch die Struktur der einzelnen Normen besser aufbauen lassen.

Für einzelne geometrische Eigenschaften fehlen noch umfassende Festlegungen zur Spezifikation und Verifikation, die über die dargestellten Ansätze hinausgehen. Besonders für Kanten und Radien sind Spezifikationsmöglichkeiten für die funktionalen Anforderungen zu definieren [Die12/1, Grö12/1].

Die schon umfangreich im GPS-System beschriebenen Defaultfestlegungen sollten weiter ausgeführt werden, um die Vereinfachung der Spezifikation zu unterstützen. Derzeit sind noch nicht für alle Spezifikations- und Verifikationsoperatoren Defaults festgelegt. Zudem fehlt auch eine Zusammenstellung, was heute bereits als Default wofür festgelegt ist. In den Defaultfestlegungen sollten auch die Allgmeintoleranzen integriert werden, die entsprechend den aktuellen Normen und der Unterscheidung in Größenmaß und Abstände überarbeitet werden müssen.

Ein Modell zur Spezifikation der Anforderungen aus Sicht der Herstellung ist derzeit nicht definiert. Ansätze, die funktionale Spezifikation in eine fertigungs-basierte Spezifikation zu übertragen, sind Gegenstand aktueller Forschung [Ans12, Cau12].

Wie im Kapitel 4.7 aufgezeigt, entstehen bereits in der Spezifikationsphase Mehrdeutigkeiten und Unsicherheiten, die einen größeren Einfluss auf die Funktionsfähigkeit eines Bauteils haben können. Derzeit existieren jedoch noch keine Methoden, diese Mehrdeutigkeiten zu bewerten oder anzugeben. Diese Thematik wird auch von Whitehouse [Whi12] aufgegriffen. Die Interaktion der Anforderungen an die Funktions-, Spezifikations- und Verifikationsoperatoren ist im Bild 98 dargestellt.

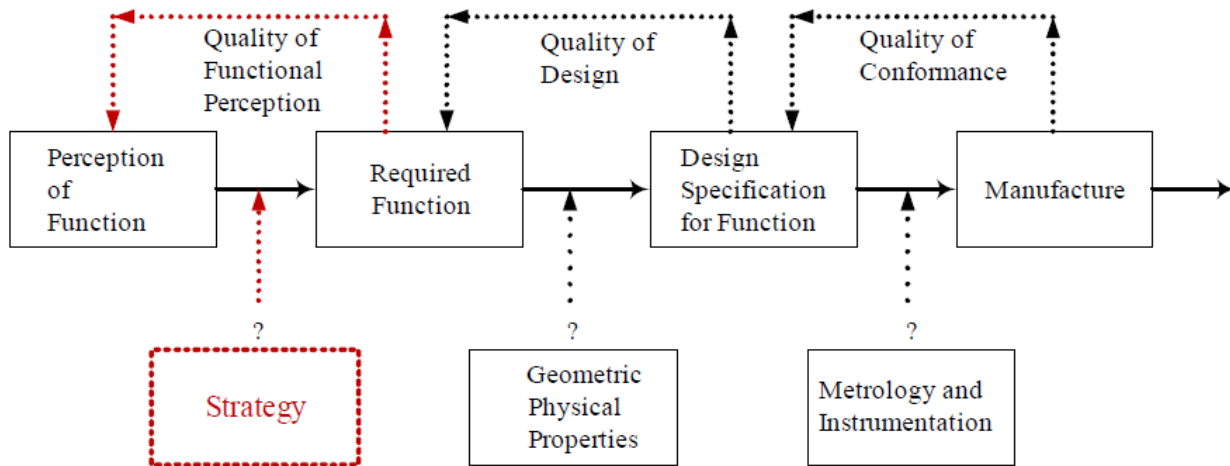


Bild 98: Funktions- und Fertigungsverknüpfung [Whi12]

Mit dem Maturity Model wird ebenfalls die Thematik der Bewertung von Spezifikations- und Verifikationsoperator aufgegriffen [Wec12/1].

Die Arbeit hat den Aspekt der funktionsgerechten Spezifikation umfangreich aufgezeigt. Welche aktuellen Festlegungen zur Verifikation definiert sind, sollte ebenso aufgearbeitet werden, um die neuen Ansätze und Messverfahren zu verbinden.

## 8 Zusammenfassung

Im System der Geometrischen Produktspezifikation und Verifikation sind die Festlegungen und Regeln zur Erstellung Technischer Produktspezifikationen und dem Nachweis der Konformität des Bauteils gegenüber dieser Spezifikation definiert. Das System basiert auf internationalen Normen, die die Grundlage einheitlichen und weltweiten Handels bilden.

Der Ausgangspunkt des GPS-Systems ist eine Normenhierarchie, die Globale GPS-Normen, GPS-Grundnormen, Allgemeine GPS-Normen und Ergänzende GPS-Normen unterteilt. Aufbauend auf dem Normensystem wurden die Inhalte der Normen in den einzelnen Kapiteln dargestellt. Grundlegende Regeln, wie z. B. das Unabhängigkeitsprinzip, das Dualitätsprinzip oder die Defaultfestlegungen wurden erläutert.

Mit Modellen, Geometrieelementen und Operationen werden Spezifikationsoperatoren und Verifikationsoperatoren beschrieben, die die Mehrdeutigkeit und Unsicherheiten bei der Spezifikation reduzieren. Entscheidend für die Spezifikation geometrischer Eigenschaften sind die Betrachtung des Nennmodells mit den idealgeometrischen Eigenschaften und die Betrachtung des nicht-idealen Oberflächenmodells mit der Darstellung von Abweichungen, die aufgrund nicht-idealer Herstellprozesse entstehen. Verschiedene Arten von Geometrieelementen und deren Invarianzgrade, die durch die Spezifikation zusätzlich eingeschränkt werden müssen, wurden dargestellt.

Mehrdeutigkeiten spiegeln den Grad der Umsetzung der Funktionsanforderungen in einer Spezifikation wider. Unsicherheiten zeigen auf, ob eindeutig spezifiziert wird und wie gut der Nachweis mit der Spezifikation übereinstimmt. Für Messunsicherheiten ist diese Vorgehensweise mit dem GUM bereits seit mehreren Jahren etabliert.

Die funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften bildet den Hauptbetrachtungsgegenstand der Arbeit. Dafür wurden die in den Allgemeinen GPS-Normen dargestellten Regeln und Festlegungen aufgezeigt. Aufbauend auf den geometrischen Eigenschaften, die den Geometrieelementen zugeordnet wurden, wird

zwischen Nicht-Größenmaßelementen und Größenmaßelementen unterschieden. Für Größenmaßelemente, wie z. B. Zylinder oder zwei parallele gegenüberliegende Flächen eines Prismas werden neben dem ISO-Toleranzsystem die umfangreichen Möglichkeiten der Spezifikation des Größenmaßes erklärt.

Nicht-Größenmaßelemente, z. B. Linien, Ebenen oder Radien, sollten zukünftig mit Ortstoleranzen und nicht mit der Plus-Minus-Tolerierung begrenzt werden, wie in der Problemstellung an verschiedenen Beispielen aufgezeigt wurde. Es konnte abgeleitet werden, dass mit Ortstoleranzen und theoretisch genauen Abständen die Begrenzung der Nicht-Größenmaßelemente eindeutiger und einfacher erfolgen kann. Somit kann auch der Ort der Größenmaßelemente, über deren abgeleitete zentrale Geometrieelemente, eindeutig gegenüber einem Bezugssystem, das aus funktionaler Sicht am Bauteil definiert wird, begrenzt werden.

Aus den erarbeiteten Spezifikationsmöglichkeiten und den bisher in der Literatur vorhandenen Ansätzen wurde folglich ein funktionsgerechtes Spezifikationsmodell entwickelt, das auf dem Nennmodell und dem nicht-idealen Oberflächenmodell aufbaut. In sechs Schritten werden die geometrischen Eigenschaften eines Bauteils betrachtet und spezifiziert. Ausgehend von der Modellebene wurden eine Bauteilebene, eine Elementebene und erweiterte Elementebenen definiert, die die grundlegenden Spezifikationsanforderungen beinhalten. Dieses System kann aufgrund der Verknüpfung des Nennmodells mit dem nicht-idealen Oberflächenmodell als Basis für eine rechnerunterstützte Spezifikation genutzt werden.

Abschließend erfolgte die Bewertung des Systems der Geometrischen Produktspezifikation und Verifikation. Besonders kritisch ist die Unübersichtlichkeit und Komplexität des GPS-Systems herausgestellt worden. Darüber hinaus konnten verschiedene Ansätze aufgezeigt werden, diese Defizite zukünftig zu beseitigen.



## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Literaturverzeichnis

#### 9.1.1 Normen

- [1] DIN EN ISO 1:2002-10, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Referenztemperatur für geometrische Produktspezifikation und -prüfung (ISO 1:2002)
- [129] ISO 129:2004-09, Technical drawings - Indication of dimensions and tolerances - Part 1: General principles
- [286-1] DIN EN ISO 286-1:2010-11, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - ISO- Toleranzsystem für Längenmaße - Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen (ISO 286-1:2010)
- [286-2] DIN EN ISO 286-2:2010-11, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - ISO- Toleranzsystem für Längenmaße - Teil 2: Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen (ISO 286-2:2010)
- [406-11] DIN 406-11:1992-12, Technische Zeichnungen - Maßeintragung Teil 11: Grundlagen der Anwendung
- [406-12] DIN 406-12:1992-12, Technische Zeichnungen - Maßeintragung Teil 12: Eintragung von Toleranzen für Längen- und Winkelmaßen
- [820-1] DIN 820-1:2009-05, Normungsarbeit - Teil 1: Grundsätze
- [820-15] DIN 820-15:2010-07, Normungsarbeit - Teil 15: Übernahme internationaler Dokumente von ISO und IEC - Gestaltung der Dokumente
- [1101(E)] DIN EN ISO (E) 1101:2012-08, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf
- [1101] DIN EN ISO 1101:2008-08, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf (ISO 1101:2004)
- [1302] DIN EN ISO 1302:2002-06, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation (ISO 1302:2002)
- [1938] ISO/R 1938:1971-04, ISO-System für Toleranzen und Passungen; Prüfung einfacher Werkstücke
- [2692] DIN EN ISO 2692:2007-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Form- und Lagetolerierung - Maximum-Material-Bedingung (MMR), Minimum-Material-Bedingung (LMR) und Reziprozitätsbedingung (RPR) (ISO 2692:2006)

- 
- |           |  |
|-----------|--|
| [2768-1]  | DIN ISO 2768-1:1991-06, Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung; Identisch mit ISO 2768-1:1989   |
| [2768-2]  | DIN ISO 2768-2:1991-04, Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Form und Lage ohne einzelne Toleranzeintragung; Identisch mit ISO 2768-2:1989  |
| [4287]    | DIN EN ISO 4287:2010-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009) |
| [4288]    | DIN EN ISO 4288:1998-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4288:1996)  |
| [4760]    | DIN 4760: 1982-06: Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem   |
| [5458]    | DIN EN ISO 5458:1999-02, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Form- und Lagetolerierung - Positionstolerierung (ISO 5458:1998)  |
| [5459]    | DIN EN ISO 5459:2011-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Bezüge und Bezugssysteme (ISO 5459:2011)   |
| [8015]    | DIN EN ISO 8015:2011-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien und Regeln (ISO 8015:2011)  |
| [8785]    | DIN EN ISO 8785:1999-10, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenunvollkommenheiten - Begriffe, Definitionen und Kenngrößen (ISO 8785:1998)   |
| [12085]   | DIN EN ISO 12085:1998-05, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Motifkenngrößen (ISO 12085:1996)   |
| [12180-1] | DIN EN ISO 12180-1:2011-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Zylindrizität - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Zylinderform (ISO 12180-1:2011)  |
| [12181-1] | DIN EN ISO 12181-1:2011-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Rundheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Rundheit (ISO 12181-1:2011)   |
| [12780-1] | DIN EN ISO 12780-1:2011-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geradheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Geradheit (ISO 12780-1:2011)   |
| [12781-1] | DIN EN ISO 12781-1:2011-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Ebenheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Ebenheit (ISO 12781-1:2011)   |
| [13005]   | DIN V 13005:1999-06, Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen   |
-

- 
- |             |  |
|-------------|--|
| [13565-1]   | DIN EN ISO 13565-1:1998-04, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 1: Filterung und allgemeine Meßbedingungen (ISO 13565-1:1996)                                    |
| [13565-2]   | DIN EN ISO 13565-2:1998-04, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve (ISO 13565-2:1996) |
| [13565-3]   | DIN EN ISO 13565-3:2000-08, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 3: Beschreibung der Höhe von Oberflächen mit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve (ISO 13565-3:1998)  |
| [13920]     | DIN EN ISO 13920:1996-11, Schweißen - Allgmeintoleranzen für Schweißkonstruktionen - Längen- und Winkelmaße; Form und Lage (ISO 13920:1996)  |
| [14253-1]   | DIN EN ISO 14253-1:1999-03, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messen Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen (ISO 14253:1998)                                      |
| [14405-1]   | DIN EN ISO 14405-1:2011-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 1: Längenmaße (ISO 14405-1:2010)  |
| [14405-2]   | DIN EN ISO 14405-2:2012-03, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung – Teil 2: Andere als lineare Maße (ISO 14405-2:2011)   |
| [14406]     | DIN EN ISO 14406:2011-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Erfassung (ISO 14406:2010)   |
| [14638]     | ISO/TR 14638:1995-12, Geometrical product specification (GPS) - Masterplan   |
| [14660-1]   | DIN EN ISO 14660-1:1999-11, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrieelemente - Teil 1: Grundbegriffe und Definitionen (ISO 14660-1:1999)  |
| [14660-2]   | DIN EN ISO 14660-2:1999-11, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrieelemente - Teil 2: Erfasste mittlere Linie eines Zylinders und eines Kegels, erfasste mittlere Fläche, örtliches Maß eines erfassten Geometrieelementes (ISO 14660-2:1999)  |
| [16610 ff.] | ISO 16610 ff.:2012, Geometrical product specifications (GPS) - Filtration  |
| [16610-1]   | DIN EN ISO 16610-1:2012-10, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte (ISO/DIS 16610-1:2012)   |
-

- 
- [17450-2(I)] ISO (E) 17450-2:2012-10, Geometrical product specifications (GPS) — General concepts — Part 2: Basic tenets, specifications, operators, uncertainties and ambiguities
  - [17450-1] DIN EN ISO 17450-1:2012-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung (ISO 17450-1:2011)
  - [17450-2(D)] DIN EN ISO (E) 17450-2:2009-07, Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) – Allgemeine Begriffe – Teil 2: Grundlegende Lehrsätze, Spezifikationen, Operatoren und Unsicherheiten (ISO/DIS 17450-2:2009)
  - [22432] DIN EN ISO 22432:2012-03, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Zur Spezifikation und Prüfung benutzte Geometrieelemente (ISO 22432:2011)
  - [23605] ISO/TR 23605:2009-12, Technical product specification (TPS) - Application guidance - International model for national implementation
  - [25178-1] DIN EN ISO 25178-1:2013-02, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 1: Eintragung von Oberflächenbeschaffenheit
  - [25178-2] DIN EN ISO 25178-2:2012-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2:2012)
  - [25178-3] DIN EN ISO 25178-3:2012-11, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 3: Spezifikationsoperatoren (ISO 25178-3:2012)
  - [25378] DIN EN ISO 25378:2011-12, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Merkmale und Bedingungen - Begriffe (ISO 25378:2011)
  - [32950] DIN V 32950:1997-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Übersicht (ISO/TR 14638:1995)
  - [45020] DIN EN ISO 45020:2007-03, Normung und damit zusammenhängende Tätigkeiten - Allgemeine Begriffe (ISO/IEC Guide 2:2004)
  - [Y14.5] ASME Y14.5.1M-1994, Mathematical Definition of Dimensioning and Tolerancing Principles. New York: The American Society of Mechanical Engineers; 2009

### 9.1.2 Schriften und Bücher

- [Ans12] Anselmetti, B.: ISO manufacturing tolerancing: three-dimensional transfer with analysis line method, Int J Adv Manuf Technol (2012) 61:1085–1099
  - [Aut12] Autodesk Product Design Suite, <http://www.autodesk.de>, 06.01.2013
  - [Cat12] CATIA V5, <http://www.3ds.com/de/products/catia/>, 06.01.2013
-

- [Cau12] Caux, M, Anselmetti, B.: 3D ISO manufacturing specifications with vectorial representation of tolerance zones, Int J Adv Manuf Technol (2012) 60:577–588
- [CENA] Europäisches Komitee für Normung: About us. 19.08.2013, <http://www.cen.eu/cen/AboutUs/Pages/default.aspx>
- [CENM] Europäisches Komitee für Normung: Mitgliedsstaaten. 19.08.2013, <http://www.cen.eu/cen/Members>
- [Cha12] Charpentier, F.: Mémento de spécification géométrique des produits. Les norms ISO-GPS. AFNOR Normalisation, CNDP, 2012, ISBN 978-2-240-03333-8
- [Cre12] PTC Creo, <http://de.creo.ptc.com/>, 06.01.2013
- [Die12/1] Dietzsch, M., Gröger, S.: XIII. Internationales Oberflächenkolloquium 2012, Tagungsband, Chemnitz, Universitätsverlag der Technischen Universität Chemnitz, 2012, ISBN 978-3-941003-55-2
- [Die12] Dietzsch, M., Gröger, S., Gerlach, M.: Messaufgaben. In: Weckenmann, A., Hrsg.: Koordinatenmesstechnik, München, Carl Hanser Verlag, 2012, S.25-51
- [DIN08] Deutsches Institut für Normung e.V.: Einführung in die DIN-Normen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008
- [DINA] Deutsches Institut für Normung e. V.: Wir über uns. 19.08.2013, <http://www.din.de>
- [Ebe12] Ebermann, M.: Tolerierung von Geometrieabweichung an einem Stirlingmotor, Projektarbeit, Technische Universität Chemnitz , 2012
- [Fen04] Feng, Y.: A CAD based Computer-Aided Tolerancing Model for the Machining Process, PhD thesis, Indiana University South Bend, 2004
- [GPS06] <http://www.gpsmatrix.dk/gpsMatrix.asp#>, 06.01.2013
- [Grö11] Gröger, S.: Funktionsorientierte Tolerierung von Form- und Lageabweichungen - Eindeutige Produktdokumente für die effiziente Konformitätsbewertung nach DIN EN ISO 1101 (DAM 1 und 2). In: DIN Tagung GPS 2011, 22./23.02.2011, Berlin, ISBN 978-3-410-21714-5
- [Grö12/1] Gröger, S.: Kanten und Radien aus Sicht der GPS. In: DIN Tagung GPS 2012, 8./9.11.2012, Berlin
- [GUM] Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen [Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), JCGM 100:2008, BIPM
- [Har09] Hartlieb, B., Kiehl, P., Müller, N.: Normung und Standardisierung – Grundlagen. Deutsches Institut für Normung, , Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2009, ISBN 978-3-410-17113-3
- [Hen11] Henzold, G: Form und Lage. Deutsches Institut für Normung, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2011, ISBN 978-3-410-21196-9

- [Hen12] Henzold, G.: Geometrische Produktspezifikationen GPS, DIN-Mitteilungen, 01/2012
- [Heg12] Heng, Z, et al.: A concurrent design method for functional tolerance and structure based on the principle of decomposition and reconstitution, 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 18th-19th April, 2012, Huddersfield, UK
- [ISOCD] ISO Standards collection on CD-ROM "Technical Product Specification-TPS" International Organization for Standardization (ISO), Version 1, 2009
- [ISOM] International Organization for Standardization: ISO members. 19.08.2013, [www.iso.org/iso/about/iso\\_members.htm](http://www.iso.org/iso/about/iso_members.htm)
- [Jor11] Jordan, W.: Form- und Lagetoleranzen – Handbuch für Studium und Beruf. München, Carl Hanser Verlag, 2009, ISBN 978-3446417786
- [Kef12] Keferstein, C. P., Marxer, M.: Einführung in die Prüfplanung. In: Weckenmann, A., Hrsg.: Koordinatenmesstechnik, München, Carl Hanser Verlag, 2012, S. 253-286
- [Kle12] Klein, B.: Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012, ISBN 978-3486712827
- [Kry12] Krystek, M.: Berechnung der Messunsicherheit: Grundlagen und Anleitung für die praktische Anwendung. Deutsches Institut für Normung, , Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2012, ISBN 978-3410209324
- [Lei03] Technische Darstellungslehre, Form- und Lagetoleranzen, <http://www.tu-chemnitz.de/mb/KL/e-learning/e-learning.php>, v 1.01, 2003
- [Leo12] Leonard, P., Pairel, E., Giordano, M.: A simpler and more formal geometric tolerancing model, 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 18th-19th April, 2012, Huddersfield, UK
- [Ney06] Neyka, S.: Analyse des nationalen Anhangs der DIN V 32950 „Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Übersicht“, Studienarbeit, Technische Universität Chemnitz, 2006
- [Nie12/1] Nielsen, H.: Recent developments in ISO-GPS Standards and strategic plans for future work, 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 18th-19th April, 2012, Huddersfield, UK
- [Nie12] Nielsen, H.: The ISO Geometrical Product Specifications Handbook. Find your way in GPS. ISO/Danish Standards, 2012, ISBN 978-87-7310-721-8
- [Ric12] Richter, P.: Analyse und Bewertung des Systems der Geometrischen Produktspezifikation und –prüfung bezüglich vollständiger Produktspezifikationen, Bachelorarbeit, Technische Universität Chemnitz 2012
- [Sch12] Schütte, W.: Form- und Lagetoleranzen. In: Rieg, F., Steinhilper, R., Hrsg. Handbuch Konstruktion, München, Carl Hanser Verlag, 2012

- [Sri12] Srinivasan, V. Reflections on the Role of Science in the Evolution of Dimensioning and Tolerancing Standards, 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 18th-19th April, 2012, Huddersfield, UK
- [TC213] <http://isotc213.ds.dk/>, 06.01.2013
- [Tru97] Trumpold, H., Beck, Ch., Richter, G.: Toleranzsysteme und Toleranzdesign – Qualität im Austauschbau. München, Carl Hanser Verlag, 1997, ISBN 3-446-17757-4
- [Wec01] Weckenmann, A., Humienny, Z. (ed.), et al.: Geometrical Product Specifications. Course for Technical Universities. Lehrstuhl für Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, 2001, ISBN 3-9805911-6-6
- [Wec12] Weckenmann, A., Gawande, B.: Einführung. In: Weckenmann, A., Hrsg.: Koordinatenmesstechnik, München, Carl Hanser Verlag, 2012, S. 1-23
- [Wec12/1] Weckenmann, A., Akkasoglu, G.: Methodic design of a customized Maturity Model for Geometrical Tolerancing, 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 18th-19th April, 2012, Huddersfield, UK
- [Whi12] Whitehouse, D.: General Metrology in Manufacture, Keynote, 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 18th-19th April, 2012, Huddersfield, UK
- [Zha11] Zhao, Y., et al.: Information Modeling for Interoperable Dimensional Metrology, London, Springer Verlag, 2011, ISBN 978-1-4471-2166-4
- [Zha12] Zhang, M., et al.: Discrete Shape Modeling for Skin Model Representation, 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 18th-19th April, 2012, Huddersfield, UK
- [Zym12] Zymnossek, J.: Verständigungs- und Grundnormen – Grundlage für Technik und Wissenschaft, DIN Mitteilungen, 01/2012

## 9.2 Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Interaktion Funktion, Herstellung und Verifikation [nach ISOCD, Wec12/1].....	3
Bild 2:	Darstellung der Geometrie.....	4
Bild 3:	3D-Modell mit Nennwerten.....	4
Bild 4:	Längentolerierung nach a) DIN 406 [406-12] und b) mit Allgemeintoleranzen nach DIN EN ISO 2768 Teil 1 [2768-1] .....	6
Bild 5:	Interpretation einer Stufentolerierung [Nie12].....	7
Bild 6:	Interpretation der Plus-Minus-Tolerierung eines Radius [Nie12].....	7
Bild 7:	Interpretation der Plus-Minus-Tolerierung einer Kante [Nie12].....	8
Bild 8:	Interpretation der Position einer Bohrungsachse [Nie12].....	8
Bild 9:	Konsequenzen der Unabhängigkeit der Dimensionen .....	8
Bild 10:	Normenhierarchie im GPS-System.....	9
Bild 11:	Normungsebenen mit Wirkungsbereich der Norm [Ney06].....	12
Bild 12:	GPS-Matrix Modell [32950].....	15
Bild 13:	Normenhierarchie mit Zuordnung der Normennummer zu den Normenarten [nach 8015 und Cha12].....	16
Bild 14:	Beispiele für die Modellierung der Nenngestalt aus Standardgeometrieelementen [Zha11, Nie12].....	25
Bild 15:	Nennmodell und Nennmodell mit Nennwerten [Die12].....	25
Bild 16:	Nicht-ideales Oberflächenmodell (Hautmodell).....	26
Bild 17:	Konzeptdiagramm für Operationen, Operatoren und Unsicherheiten [17450-2(D)].....	29
Bild 18:	Beispiele für GPS-Spezifikationselemente.....	30
Bild 19:	Eintragung eines abgewandelten GPS-Spezifikationsoperators [8015].....	31
Bild 20:	Sechs Invarianzgrade eines Bauteils [Nie12].....	36
Bild 21:	Beispiele für das Größenmaß für lineare Größenmaßelemente [Nie12].....	39
Bild 22:	Größenmaß für Winkel- und Kegelelemente [Nie12].....	39



Bild 23:	O-Ring zur Veranschaulichung des Begriffs „einparametrische Familie“ [22432]..	40
Bild 24:	Eigenschaften idealer Geometrieelemente am Beispiel eines Torus [17450-1, 22432].....	43
Bild 25:	Beispiele für zentrale Punkte: a) Mittelpunkt zweier Punkte, b) nominaler Mittelpunkt eines Kreises, c) berechneter Mittelpunkt eines Kreises [22432].....	45
Bild 26:	Extrahierte zentrale Linie eines Zylinders [14660-2].....	46
Bild 27:	Extrahierte zentrale Fläche [14660-2].....	47
Bild 28:	Versetzte Linie [22432].....	48
Bild 29:	Partition des Nennmodells.....	50
Bild 30:	Nicht-ideales Oberflächenmodell und Partition des nicht-idealen Oberflächenmodells.....	51
Bild 31:	Extraktion von Punkten an einem Geometrieelement des nicht- idealen Oberflächenmodells.....	52
Bild 32:	Filterung eines Profils [17450-1].....	52
Bild 33:	Assoziationskriterien am Kreis [nach 12181-1].....	54
Bild 34:	Beispiel einer Assoziation am Zylinder [17450-1].....	55
Bild 35:	Sammlung zweier idealer Zylinder [17450-1].....	56
Bild 36:	Konstruktion einer Geraden durch den Schnitt zweier idealer Ebenen [17450-1].....	56
Bild 37:	Matrixstruktur der Definition der Geometrieelemente [14660-1].....	59
Bild 38:	Beziehung der Definition der Geometrieelemente [14660-1].....	60
Bild 39:	Vergleich zwischen der nominalen Konstruktion und der Konstruktionsabsicht [17450-1].....	61
Bild 40:	Parallele Spezifikations- und Verifikationsprozeduren [17450-1].....	62
Bild 41:	Zusammenhang zwischen Unsicherheiten und Operatoren (Ausschnitt aus Bild 17) [17450-2(D)].....	64
Bild 42:	Spezifikationsunsicherheit vergrößert die Toleranzzone [nach Nie12]	66
Bild 43:	Einschränkung der Konformitätszone durch die Messunsicherheit beim Hersteller [nach Nie12].....	67

Bild 44:	Erweiterung der Konformitätszone durch die Messunsicherheit beim Lieferanten [nach Nie12].....	67
Bild 45:	Neue Unterteilung der geometrischen Eigenschaften.....	71
Bild 46:	Richtung und Ort eines Geometrieelementes zu einem Bezug [nach Zha11].....	72
Bild 47:	Ordnungssystem für Gestaltabweichungen [4760].....	73
Bild 48:	Unterscheidung von Größenmaß und Abstand.....	74
Bild 49:	Spezifikation des Zweipunktmaßes.....	76
Bild 50:	Mehrere Zweipunktmaße an einem Zylinder (di: Durchmesser; Ni, und Mi: Messpunkte an der Stelle i) [nach Cha12].....	76
Bild 51:	Definition sphärisches Maß ( $S\phi d_{1-n}$ : Kugeldurchmesser am Punkt $P_{1-n}$ ) [14405-1].....	77
Bild 52:	Beispielhafte Darstellung des Querschnittsgrößenmaßes [14405-1]....	78
Bild 53:	Darstellung des Größenmaßes nach der Methode der kleinsten Quadrate an einem Zylinder.....	80
Bild 54:	Darstellung des kleinsten umschriebenen Größenmaßes an einem Zylinder.....	80
Bild 55:	Darstellung des größten einbeschriebenen Größenmaßes an einem Zylinder.....	80
Bild 56:	Darstellung der verschiedenen Rangordnungsmaße für einen Zylinder [14405-1].....	81
Bild 57:	Einteilung der Rangordnungsmaße mit Kurzbeschreibung entsprechend der Definitionen in DIN EN ISO 14405 Teil 1 [14405-1]..	82
Bild 58:	Überblick über die in DIN EN ISO 14405 Teil 1 [14405-1] definierten Größenmaße.....	82
Bild 59:	Ausschnitt aus der Tabelle der Grundtoleranzgrade [286-1].....	83
Bild 60:	Toleranzsystem für Einheitsbohrung [nach 286-1].....	84
Bild 61:	Toleranzsystem für Einheitswelle [nach 286-1].....	85
Bild 62:	Einheitsbohrung und Einheitswelle mit alternativer Darstellung und der Eintragung der Hüllbedingung.....	86
Bild 63:	Toleranzrahmen mit der Beschreibung der fünf Felder.....	87
Bild 64:	Kennzeichnung des tolerierten Elementes [1101, 1101(E)].....	90

Bild 65:	Kennzeichnung der Tolerierung eines zentralen Elementes [1101, 1101(E)].....	91
Bild 66:	Richtungsabhängigkeit der Toleranzzone: a) Zeichnungseintragung [1101], b) Toleranzzonen.....	91
Bild 67:	Für mehrere Geometrieelemente gilt: a) gleicher Wert b) gemeinsame Zone [1101].....	92
Bild 68:	Bezug durch Zuordnung aus dem Bezugselement abgeleitet [nach Nie12].....	94
Bild 69:	Zentrale Linien als Bezug, aus a) Hüllzylinder und b) Pferchzylinder berechnet [nach Nie12].....	94
Bild 70:	Freiheitsgrade, gebunden durch die zentrale Linie eines Zylinders [Nie12].....	95
Bild 71:	Drei-Ebenen-Bezugssystem [5459].....	96
Bild 72:	Bezugsstellen [5459].....	96
Bild 73:	Radiustolerierung mit Profil einer beliebigen Fläche [Nie12].....	100
Bild 74:	Begrenzung der Formabweichung mit der Richtungstoleranz am Beispiel der Parallelität einer zentralen Linie zu einer Fläche: a) Spezifikation [1101], b) Darstellung der Toleranzzone [Zha11].....	101
Bild 75:	Begrenzung der Form- und Richtungsabweichung durch die Ortstolerierung: a) Spezifikation, b) Interpretation [Zha11].....	102
Bild 76:	Radiustolerierung mit Bezugssystem [Nie12].....	104
Bild 77:	Positionstolerierung eines abgeleiteten Geometrieelementes zu einer Fläche [Nie12].....	104
Bild 78:	Abhängige Tolerierungsmöglichkeiten.....	107
Bild 79:	Ersatz des Symbols für die Hüllbedingung.....	109
Bild 80:	Beispiele für die Kennzeichnung der Oberflächenunvollkommenheiten [Nie12].....	112
Bild 81:	Kennzeichnung der Anforderungen an die Oberfläche [1302].....	117
Bild 82:	Unterscheidung der Oberflächenprofile.....	119
Bild 83:	Einzelmessstrecken für die Rauheit [nach 288].....	120
Bild 84:	Angabe der Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit [1302]..	121
Bild 85:	Oberflächenprofilelement [4287].....	121

Bild 86:	Gemessenes Profil mit Amplitudendichte- und Materialtraganteilskurve.....	122
Bild 87:	Beispiel für eine Oberflächenspezifikation.....	122
Bild 88:	Vorschlag für die Kennzeichnung von 3D-Oberflächenparametern [25178-1].....	123
Bild 89:	Matrix 1 für Kanten und Flächen in Verbindung mit den Toleranzarten [Lei03].....	124
Bild 90:	Matrix 2 für Achsen und Mittelebenen sowie Körper in Verbindung mit den Toleranzarten [Lei03].....	125
Bild 91:	Dekomposition und Rekonstruktion der Struktur und Funktionsanforderungen [Heg12].....	127
Bild 92:	Vereinfachtes geometrisches Toleranzmodell [Leo12] mit Auflistung der einzelnen Schritte.....	129
Bild 93:	Baugruppe mit Einzelteilen, an denen die Funktionsflächen gekennzeichnet sind [Nie12].....	131
Bild 94:	Vollständig tolerierte Welle [Nie12].....	132
Bild 95:	Vollständig tolerierte Aufnahme [Nie12].....	133
Bild 96:	Funktionsgerechtes geometrisches Spezifikationsmodell.....	134
Bild 97:	Funktionsgerechte Tolerierung von Abständen und Größenmaßelementen in einem Bezugssystem.....	138
Bild 98:	Funktions- und Fertigungsverknüpfung [Whi12].....	142

### 9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Aufbau der Allgemeinen GPS-Matrix [32950].....	17
Tabelle 2:	Bild der wirklichen Oberfläche und der Oberflächenmodelle [nach 22342] .....	27
Tabelle 3:	Übersicht der Definitionen der Spezifikationsoperatoren und -operationen mit Verweis auf die Normenkapitel [17450-2(D)].....	32
Tabelle 4:	Übersicht der Definitionen der Verifikationsoperatoren (Prüfungsoperatoren) und –operationen mit Verweis auf die Normenkapitel [17450-2(D)].....	34
Tabelle 5:	Geometrieelemente, abgeleitet aus den verschiedenen Oberflächenmodellen.....	35
Tabelle 6:	Invarianzklassen, Typen und Situationselemente idealer Geometrieelemente [17450-1].....	37
Tabelle 7:	Beispiele intrinsischer Merkmale [25378].....	40
Tabelle 8:	Situationselemente [17450-1, 22432].....	42
Tabelle 9:	Arten nominaler abgeleiteter Geometrieelemente [22432].....	49
Tabelle 10:	Geometrieelemente und mögliche Assoziationskriterien [Kef12].....	54
Tabelle 11:	Möglichkeiten der Einschränkung der freien Parameter eines Geometrieelementes [nach 25378].....	58
Tabelle 12:	Allgemeine GPS-Matrix mit Kennzeichnung der Kettenglieder für die Spezifikation [nach 32950].....	70
Tabelle 13:	Modifikationssymbole für Größenmaße und deren Beschreibung [14405-1].....	75
Tabelle 14:	Weitere Spezifikations-Modifikationssymbole und deren Beschreibung [14405-1].....	77
Tabelle 15:	Spezifikations-Modifikationssymbole für örtliche Maße [14405-1].....	79

Tabelle 16:	Überblick über die Symbole zur Tolerierung der geometrischen Eigenschaften in der Norm DIN EN ISO 1101 mit dem Abschnitt im Dokument [1101] .....	88
Tabelle 17:	Zonen und deren grafische Darstellung [nach 1101].....	89
Tabelle 18:	Zusätzliche Symbole [1101].....	92
Tabelle 19:	Neue Symbole in E DIN EN ISO 1101:2012 [1101(E)].....	93
Tabelle 20:	Gegenüberstellung Bezugssystem und gemeinsamer Bezug [5459].....	97
Tabelle 21:	Übersicht über Formtoleranzen mit Toleranzzonen.....	99
Tabelle 22:	Übersicht über Richtungstoleranzen und zugehörigen Toleranzzonen.....	101
Tabelle 23:	Übersicht über Ortstoleranzen.....	103
Tabelle 24:	Lauftoleranzen, Toleranzzonen und Anwendungsspektrum.....	105
Tabelle 25:	Gegenüberstellung der Hüllbedingung für Innen- und Außenzyylinder.....	108
Tabelle 26:	Merkmale und Kenngrößen der Oberflächenunvollkommenheiten [8785].....	113
Tabelle 27:	Arten von Oberflächenunvollkommenheiten [8785].....	114
Tabelle 28:	Symbole zur Eintragung der Rauheit.....	116
Tabelle 29:	Oberflächenrillen [1302].....	118
Tabelle 30:	Beispiele für Kenngrößen und zugehörige Strecken.....	119
Tabelle 32:	IfGPS 8-point tolerance procedure <sup>TM</sup> [Nie12].....	130

## 9.4 Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Terminologietabelle NA 152-03-02 AA N 2169